Experimentelle Untersuchung des Farbspritzvorgangs

Von der

Technischen Hochschule zu Breslau

zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs

genehmigte

DISSERTATION

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Hans Grosse
aus Berlin

Referent:
Prof. R. Krauß

Korreferent:
Prof. K. Gottwein

Tag der mündlichen Prüfung: 29. Juli 1933

1933
VDI-VERLAG G.M.B.H.
BERLIN NW 7

Experimentelle Untersuchung des Farbspritzvorgangs

Von der

Technischen Hochschule zu Breslau
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs

genehmigte

DISSERTATION

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Hans Grosse
aus Berlin

Referent:
Prof. R. Krauß

Korreferent:
Prof. K. Gottwein

Tag der mündlichen Prüfung: 29. Juli 1933

1933
VDI-VERLAG G.M.B.H.
BERLIN NW 7

Inhaltverzeichnis

Seite

A. Einleitung

Zweck der vorliegenden Untersuchung 1

B. Beschreibung der mechanischen Vorgänge und Aufgabenstellung . . 1

1. Vorgänge in und unmittelbar hinter der Düse 1
2. Vorgänge im freien Strahl 1
3. Vorgänge beim Aufprall auf die Wand 2
4. Aufgabenstellung 2

C. Untersuchte Farbspritzgerät und verwendetes Versuchsmaterial . . 2

1. Beschreibung der untersuchten Pistole 2
2. Zusammensetzung der untersuchten Farbsorten 3
3. Verwendeter Spritzgrund 3

D. Vorhandene Untersuchungen auf verwandten Gebieten 4

1. Zerstäubungsvorgänge 4
2. Strömungsvorgänge im freien Strahl 4
3. Transport- und Ausscheidungsvorgänge kleiner Körper in bewegter Luft 5

E. Versuchseinrichtungen und rechnerische Auswertung der Versuchsergebnisse 5

1. Grundsätzliche Bemerkungen zu den Versuchen 5
2. Messung von Tropfengröße und Tropfenhäufigkeit 6
   a) Versuchsverfahren und Versuchsgeräte 6
   b) Rechnerische Auswertung 7
3. Untersuchung der Vorgänge an der Düse 8
   a) Versuchsverfahren 8
   b) Rechnerische Ermittlung der Luftgeschwindigkeiten beim Austritt 8
4. Aufstellung der Energiebilanz 9
5. Geschwindigkeits- und Mengenmessung im Strahl 11
   a) Meßgeräte und Versuchsverfahren 11
   b) Rechnerische Ermittlung der Geschwindigkeits- und Mengengrößen im Strahl 12
   c) Ermittlung der Tropfenbahnen und Aufschlaggeschwindigkeiten . 14
   d) Ermittlung der Tropfenverteilung im Strahl 15
   e) Ermittlung der Farbverteilung im fertigen Film 15

F. Zusammenfassung der Versuchsergebnisse 16

Schrifttumverzeichnis 17

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Die Dissertation erschien als selbständige Veröffentlichung unter dem gleichen Titel in der Schriftenreihe des Fachausschusses für Anstrichtechnik beim Verein deutscher Ingenieure und Verein deutscher Chemiker (Heft 15) im VDI-Verlag, G.m.b.H., Berlin NW 7

A. Einleitung

Zweck der vorliegenden Untersuchung

Die bisher unternommenen größeren Untersuchungen über das Farbspritzverfahren vergleichen kritisch die baulichen Eigenschaften der verschiedenen Farbspritzgeräte und die daraus folgende Betriebsbrauchbarkeit und Beschränkung der einzelnen Systeme auf besondere Aufgaben; sie erstrecken sich also überwiegend auf die für Werkstattbrauchbarkeit und rationelle Fertigung entscheidenden Faktoren. Hierunter sind in erster Linie die Flächenleistung, der spezifische Farb- und Luftverbrauch und wegen der gewerbehygienischen Fragen die Nebelbildung zu verstehen.

Die eigentlichen mechanisch-physikalischen Ursachen für das verschiedene Verhalten einzelner Bauarten sowie ihre Eignung für die verschiedenen Anstricharbeiten werden hierbei lediglich als Nebenfragen behandelt. Der Zweck der vorliegenden Arbeit ist der, den Gesamtvorgang in seine einzelnen Komponenten zu zergliedern, diese, soweit möglich, zahlenmäßig zu erfassen und damit die Grundlagen für die Weiterentwicklung der Spritzgeräte und der Prüfverfahren zu schaffen.

Gleichzeitig ergibt sich infolge der untrennbaren Verquickung mechanischer und chemischer Vorgänge bei der Filmbildung die Verbindung mit einer Reihe rein chemischer Fragen, deren Beantwortung für die Haltbarkeit und Schutzwirkung des gespritzten Anstrichs von wesentlicher Bedeutung wäre.

Zur Klärung der verhältnismäßig verwickelten Vorgänge erscheint es zunächst am zweckmäßigsten, die Farbe auf ihrem Wege vom Farbbehälter durch die Düse und den freien Strahl bis zu ihrem Aufschlagen auf die Wand zu verfolgen. Hieraus ergibt sich eine zwanglose Teilung des Gesamtvorganges in Einzelvorgänge in und unmittelbar hinter der Düse, Vorgänge im freien Luftfarbstrahl und Vorgänge beim Aufprall auf die Wand, Abb. 1.

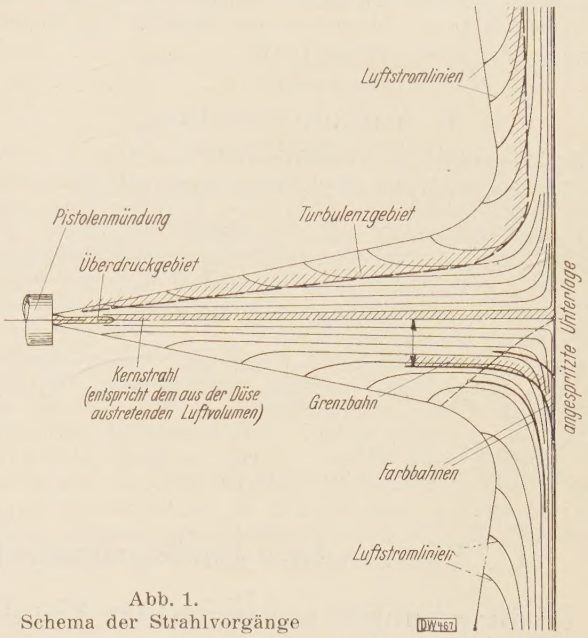


Abb. 1.
Schema der Strahlvorgänge

B. Beschreibung der mechanischen Vorgänge — Aufgabenstellung

1. Vorgänge in und unmittelbar hinter der Düse

Bei den im Betrieb am häufigsten verwandten Pistolenbauarten ist die Düsenanordnung derart ausgebildet, daß die zentral liegende, durch eine Farbnadel abschließbare Farbbohrung konzentrisch von einer kreisringförmigen Luftdüse umgeben ist. Bei dieser Anordnung entsteht infolge der hohen, zum Teil überkritischen Geschwindigkeit der austretenden Luft vor der Farbdüse ein Unterdruckraum, der von einem zungenförmigen Überdruckgebiet umgeben ist, Abb. 2 und 3. Die Farbe tritt, zum Teil wegen des Überdrucks infolge ihrer Standhöhe im Farbbecher, zum Teil infolge des vor der Farbbohrung entstehenden Unterdrucks aus der Bohrung aus und kriecht auf der zwischen Farb- und Luftdüse befindlichen ringförmigen Fläche auf die Luftdüse zu. Ihr Eintritt in die austretende Zerstäubungsluft erfolgt unmittelbar am Düsenrand, wobei sie je nach dem Mengenverhältnis von Farbe zu Luft verschieden tief in den sich bildenden Luftkegel eintritt.

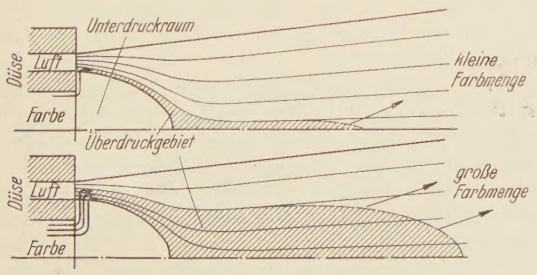


Abb. 2 und 3. Schema der Vorgänge an der Düse

Infolge der hohen Relativ-Geschwindigkeit zwischen Luft und Farbe erfolgt an dieser Stelle die Zerstäubung zu je nach Farbsorte und Spritzdrücken verschieden großen Teilchen. Gleichzeitig werden die sich bildenden Tropfen beschleunigt, bis sie nach einer verhältnismäßig kurzen Strecke die Luftgeschwindigkeit erreicht haben.

2. Vorgänge im freien Strahl

Von dieser Stelle an folgen sie zunächst, da sie infolge ihrer geringen Masse keine wesentlichen Relativbewegungen gegenüber der Luft ausführen können, von etwaigen Wirbeln abgesehen, den Stromlinien der Luft. Der Luft-Farb-Strahl selbst saugt infolge der Reibung zwischen der austretenden, bewegten Luft gegenüber der ruhenden Außenluft die letztere in sich hinein und vergrößert so unter Abnahme der Geschwindigkeit sein Eigenvolumen beträchtlich.

Unter Umständen tritt im freien Strahl während der Transportzeit eine Verdunstung des Farblösungsmittels ein, die die Bindefähigkeit des entstehenden Farbfilms sowie sein Aussehen auf das nachteiligste beeinflußt.

3. Vorgänge beim Aufprall auf die Wand

Kurz vor Erreichen der anzuspritzenden Wand teilt sich der Strahl rotationssymmetrisch nach allen Seiten, die Tropfen verlassen infolge der ihnen innewohnenden kinetischen Energie die sich krümmenden Stromlinien und versuchen, die abfließende Luft in Richtung der Wand zu durchschlagen. Hierbei erreicht jedoch nur der im Inneren des Kegels befindliche Tropfenanteil die Unterlage, s. Abb. 1, während der außerhalb der „Grenzbahn" befindliche Anteil infolge geringerer Eigengeschwindigkeit und längerer Wege durch ablenkende Luftmengen seitlich fortgespült wird und als Farbnebel und Farbstaub in den Raum geht. Die auf den Spritzgrund gelangenden Tropfen vereinigen sich dort zum Farbfilm, dessen Dicke entsprechend der ungleichmäßigen Farbverteilung im Strahl und der stärkeren Ablenkung der äußeren Tropfen mit zunehmender Breite geringer wird.

4. Aufgabenstellung

Mit Ausnahme der Düsenvorgänge, die sich je nach Ausführung (mit oder ohne Luftschutzmantel, Drallstrahl oder Zerstäuberrädchen, verschiedene Lage von Luft- und Farbdüse zueinander usw.) natürlich verschieden abspielen, sind die Vorgänge bei den verschiedenen Systemen im freien Strahl und beim Aufprallen auf die Wand grundsätzlich einander gleich und unterscheiden sich nur zahlenmäßig voneinander.

Bei gleicher Farbsorte und gleichem Untergrund bestimmen die folgenden Einflüsse die Güte des fertigen Anstrichs:

Tropfengröße,
Tropfengeschwindigkeit,
Aufprallwinkel,
Gleichmäßigkeit der Tropfenverteilung an der Aufschlagstelle.

Für die Brauchbarkeit der Pistole spielen neben konstruktiver und wirtschaftlicher Eignung, die hier nicht näher zu untersuchen sind, die entwickelten Nebelmengen eine wichtige Rolle.

Diese Größen sind im folgenden quantitativ und qualitativ zu bestimmen sowie ihre Zusammenhänge untereinander festzustellen. Es werden also bei einer Pistole und einer Düsenweite die Spritzdrücke und Farbsorten geändert. Hierbei wird, um zunächst auch für die Praxis brauchbare Werte zu schaffen, die im Betrieb wohl meist verwandte, bereits oben kurz beschriebene Düsenbauart untersucht. Die Versuche beschränken sich zunächst auf die im Rundstrahl auftretenden Verhältnisse, als Spritzgrund gelangen Glasplatten zur Anwendung.

Der Spritzüberdruck wird in Abständen von je 1 at von 0,5 auf 4,5 at gesteigert, umfaßt also den gesamten praktisch angewendeten Druckbereich. Als Spritzgut werden nach Zusammensetzung und Verhalten im fertigen Anstrich scharf unterschiedene Farbsorten verwandt, und zwar ein Nitroklarlack, ein Ölklarlack, eine pigmentierte Ölgrundfarbe sowie eine Ölspachtel.

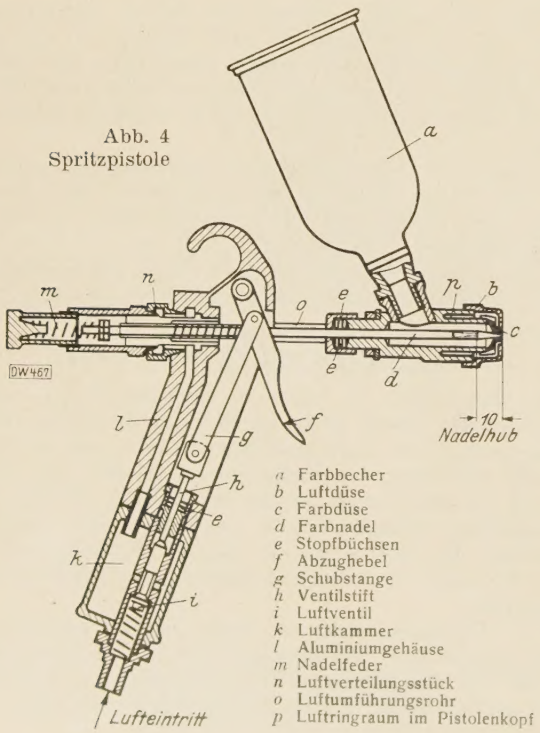
Aufgabe späterer Forschung wäre es, den Einfluß der verschiedenen Düsenbauarten, namentlich auf die Feinheit der Zerstäubung auch bei extremem Niederdruck (etwa 0,05 at Spritzüberdruck), das Verhalten der Tropfen beim Aufschlag auf anders geartete Oberflächen sowie die bei der Filmbildung auftretenden mechanischen Erscheinungen näher zu untersuchen und kritisch zu vergleichen. Ebenso wäre der Einfluß der verschiedenen Größen auf die Haltbarkeit und Sauberkeit der Filme zu prüfen.

C. Untersuchtes Farbspritzgerät und verwendetes Versuchsmaterial

1. Beschreibung der untersuchten Pistole

Die untersuchte Spritzpistole, Abb. 4 und 5, stellt ein weit verbreitetes Fabrikat für den normalen Durchschnittsgebrauch in Handwerk und Industrie dar, kann mit Spritzüberdrücken von 1,0 bis 4,5 at betrieben werden und verarbeitet bei geeigneter Düsenauswahl alle praktisch vorkommenden Farbsorten.

Abb. 4
Spritzpistole



a Farbbecher
b Luftdüse
c Farbdüse
d Farbnadel
e Stopfbüchsen
f Abzughebel
g Schubstange
h Ventilstift
i Luftventil
k Luftkammer
l Aluminiumgehäuse
m Nadelfeder
n Luftverteilungsstück
o Luftumführungsrohr
p Luftringraum im Pistolenkopf

Die Luft tritt am unteren Ende des Pistolenhandgriffs ein; der Lufteintritt wird durch das Ventil *i* freigegeben. Die Luft strömt danach durch die im Handgriff vorgesehenen Bohrungen und gelangt schließlich durch die seitlich angebrachten Umführungsrohre *o* in den Luftringraum *p* und endlich bis an die eigentliche Luftdüse *b*. Die Farbe befindet sich in dem über der Pistole befindlichen Farbbecher *a*, fließt zunächst infolge ihres statischen Überdruckes durch den vorderen Teil des Pistolenkörpers und tritt dann durch die eigentliche Farbdüse *c* in die Zerstäubungsluft ein.

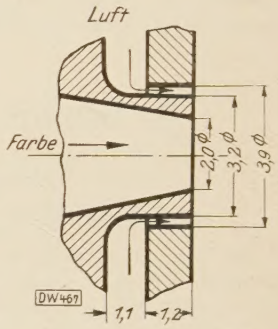


Abb. 5. Düse der Spritzpistole

Der Farbabschluß und die Dosierung der Farbmengen erfolgt durch die in die Farbdüse eingeschliffene Farbnadel *d*, die im Betrieb gemeinsam mit dem Luftventil *i* durch den Pistolenabzug *f* bedient wird. Beim Spritzen mit voller Farbmenge, das auch bei den Versuchen durchgeführt wurde, wird die Nadel soweit zurückgezogen, daß eine Beeinflussung des austretenden Farbstrahls nicht in Frage kommt. Die verwandte Düsengröße mit 2,0 mm Dmr. der Farbdüse und 3,9 mm Dmr. der Luftdüse ist eine der meist benutzten Düsenanordnungen für die vorliegende Pistolengröße.

Düse und Pistole waren vor Beginn der Versuche neu und wurden vor Inbetriebnahme besonders sorgfältig ge-

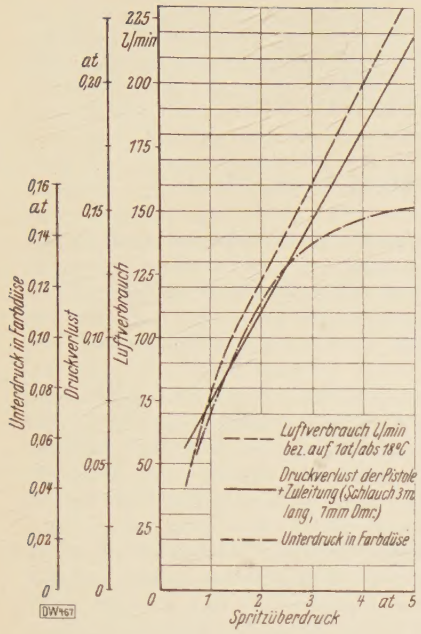


Abb. 6. Luftverbrauch, Druckverlust u. Unterdruck in der Farbdüse in Abhängigkeit vom Spritzdruck

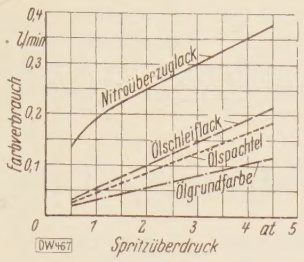


Abb. 7. Farbmengenleistung der Pistole

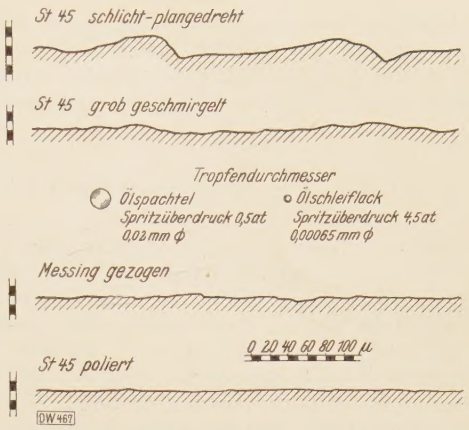


Abb. 8. Oberflächenbeschaffenheit verschiedener Spritzgründe

reinigt sowie an einigen Stellen nachgearbeitet und entgratet.

Abb. 6 stellt Luftverbrauch, Druckverlust innerhalb der Pistole und Zuleitung sowie die auf die Farbe ausgeübte Saugwirkung in Abhängigkeit vom Spritzüberdruck dar. Abb. 7 gibt die Farbleistung für die verschiedenen Farbsorten an, wobei bei gleichem Spritzüberdruck das austretende Farbvolumen naturgemäß um so größer wird, je dünnflüssiger die verwandte Farbsorte ist.

Die vorliegenden Zahlen wurden für die benutzte Pistole und Düse mittels einfacher Messungen (Behältermessung für Luftverbrauch, Messung mit U-Rohr für die Ermittelung der Saug- und Verlusthöhen, Wägungen der Pistole vor und nach dem Spritzen zur Ermittelung der Farbleistung) gefunden. Sie fügen sich als gute Mittelwerte in die für andere Fabrikate ermittelten Verbrauchzahlen ein [35] [1]).

1) Die Zahlen in eckigen Klammern beziehen sich auf die im Schrifttumverzeichnis, S. 17, aufgeführten Arbeiten.

2. Zusammensetzung der untersuchten Farbsorten

Die Zusammensetzung der für die Zerstäubungs- und Filmbildungsversuche benutzten Farbsorten Nitroklarlack, Ölklarlack, Ölgrundfarbe und Ölspachtel geht aus der Zahlentafel 1 hervor; sie wurden mir liebenswürdigerweise von den einzelnen Lieferfirmen überlassen. Sie entsprechen normalgemischten und in der Praxis üblichen Sorten. Soweit keine eingehenderen Zahlen angegeben sind, wurden die Farben nur zu gelegentlichen Kontrollversuchen, namentlich hinsichtlich ihrer Eigenschaften bei der Farbfilmbildung, benutzt. Leider war es nicht möglich, die Zähigkeits- und Kapillarwerte der einzelnen Sorten eingehend zu bestimmen, so daß ich mich mit der in der Praxis üblichen gefühlsmäßigen Bestimmung der Zähigkeit sowie der Zähigkeitsfolge begnügen mußte.

3. Verwendeter Spritzgrund

Als Spritzgrund, d. h. als Untergrund für die Tropfenmessungen und Untersuchungen bei der Filmbildung, wurden von ihrer Emulsionsschicht befreite photographische Platten benutzt. Diese boten neben der Möglichkeit, die Proben beim Mikroskopieren in auffallendem und durchfallendem Licht beobachten zu können, sowie neben ihrer

Zahlentafel 1 Die für die Versuche benutzten Farbsorten

Lieferfirma	Farbsorte	Bezeichnung	Zusammensetzung	Spez. Gewicht	Bemerkungen
C. F. Heyde, Berlin-Britz	Nitroüberzuglack, farblos	Heydeol-Überzugslack		0,88	leicht angefärbt
desgl.	Ölschleiflack, farblos	Lackol-Schleiflack	41 % Albertol 22,5 % Holzöl eingedickt 5 % Sikkativ 31,5 % Testbenzin + Terpentinöl	0,91	leicht angefärbt
desgl.	Ölspachtel, grau	Autospachtel	Pigment: 33 Teile Schiefer 18 „ Kreide 10 „ Zinkoxyd, bleihaltig 6 „ Bleioxyd 3 „ Eisenoxyd Bindemittel: 18 „ Harzlack 13 „ sikkatisiert. Bleioleat	1,70	im Verhältnis 8 : 1 verdünnt mit Terpentinersatz Curt Böhm, Berlin
H. Frenkel, Mölkau b. Leipzig	Ölgrundfarbe, braun	Faktor-Grundfarbe, braun		1,65	
C. F. Heyde	Weißer Emaillelack	Albulin-Japanemaillelack	53 % Pigment (Zinkweiß) 14 % Testbenzin 33 % Standöl + Verlaufmittel		Im Verhältnis 5 : 1 verdünnt mit Testbenzin
Dr. J. Perl, Berlin-Tempelhof	Nitropolierlack	Perluco-Polierlack, weiß			
desgl.	Nitropolierlack	Perluco-Polierlack, grün			

absoluten chemischen Neutralität dank ihrer Politur die Gewähr für gleichmäßige Oberflächenbeschaffenheit. Infolge der geringen Größe der sich bei der Zerstäubung ergebenden Tropfen ist es nämlich nicht mehr möglich, die Unebenheiten selbst verhältnismäßig sorgfältig bearbeiteter Oberflächen zu vernachlässigen, wie die Gegenüberstellung in Abb. 8 zeigt, die neuesten Untersuchungen über die Oberflächenbeschaffenheit [37] entnommen ist.

D. Vorhandene Untersuchungen auf verwandten Gebieten

Da, wie bereits erwähnt, physikalische Untersuchungen über den Farbspritzvorgang noch nicht angestellt worden sind, ist es erforderlich, Versuche auf anderen Gebieten, auch wenn sie nur Teilvorgänge der Gesamtaufgabe berücksichtigen, heranzuziehen. Hierbei wären entsprechend der Unterteilung besonders Zerstäubungsuntersuchungen mit oder ohne Druckluft, Strömungsvorgänge in Luftstrahlen, die aus Düsen in den freien Raum austreten, sowie Transport- und Ausscheidungsvorgänge von kleinen Körpern in bewegter Luft zu berücksichtigen.

1. Zerstäubungsvorgänge

Die eingehendsten technischen Untersuchungen über die Zerstäubung von Flüssigkeiten hat man auf dem Gebiete der Vergaser- und Dieselmotoren unternommen, worüber Abb. 9 und Zahlentafel 2 einen Überblick geben.

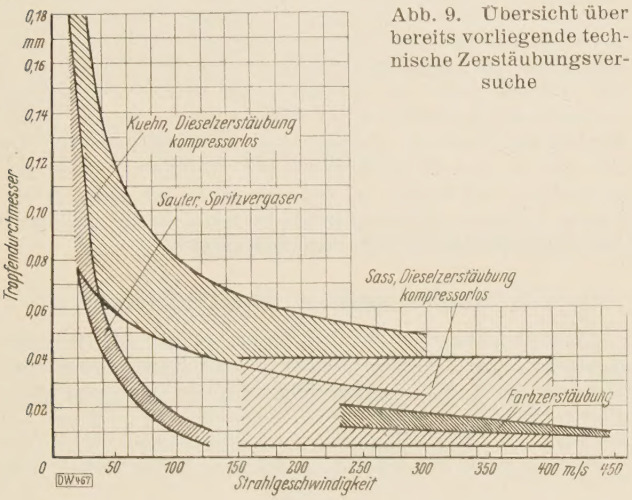


Abb. 9. Übersicht über bereits vorliegende technische Zerstäubungsversuche

Die *Kuehn*schen Zerstäubungsversuche [15], die mit einer Dralldüse von 0,53 mm Dmr. und atmosphärischem Gegendruck unternommen wurden, lassen unter Umständen nach eigener Angabe des Verfassers Ungenauigkeiten von 100 % erwarten, was in der Art der Messung begründet liegt. *Kuehn* fängt die zerstäubte Flüssigkeit auf berußten Glasplatten auf und ermittelt durch Auszählen der Aufschläge und Wägung der Platten vor und nach dem Besprühen den mittleren Durchmesser. Da das Plattengewicht bis zu vierzigtausendmal größer als das Flüssigkeitsgewicht ist, läßt dieses Verfahren kaum genaue Ergebnisse erwarten. *Saß* [20] ermittelt die Durchmesser durch Auffangen der Tropfen in einer mit Gasöl unvermischbaren Flüssigkeit und nachträgliche mikroskopische Auszählung und Ausmessung mit dem Okularmikrometer, während *Sauter* [22], [23] den Lichtstärkenverlust einer bekannten Lichtquelle infolge Beugung und Absorption durch das in einer Rohrleitung strömende Wasser- oder Petroleum-Luft-Gemisch photometrisch mißt und so ebenfalls zu einem mittleren Durchmesser kommt.

Während die Versuche von *Kuehn* und *Saß* gemeinsam den Strahlzerfall und die Zerstäubung ohne Hilfe von Druckluft, im Grunde also einen grundsätzlich anderen Vorgang behandeln, kommen die *Sauter*schen Versuche wegen der Bauart des untersuchten einfachen Spritzvergasers dem Farbspritzverfahren bedeutend näher, ohne jedoch Geschwindigkeiten ähnlicher Größenordnung zu erreichen. Die untersuchten Flüssigkeiten treten hierbei infolge geringen inneren Überdruckes (0,1 at) aus einer einfachen Bohrung von 1,3 mm Dmr. aus und werden dann von der im Saugstutzen vorbeistreichenden Luft zerrissen.

Rein theoretisch wird die Zerstäubung mit und ohne Druckluft von *Triebnigg* [19] untersucht, ohne daß sich jedoch die aus diesen Überlegungen ergebenden Tropfenabmessungen mit den praktischen Ergebnissen der anderen Forscher vergleichen ließen. Die Arbeit bringt jedoch eine Reihe grundsätzlich wertvoller Überlegungen, von denen auch im folgenden noch Gebrauch gemacht wird.

Wie sich aus Abb. 9 ergibt, fügen sich die eigenen Versuche bezüglich der Tropfengröße und ihrer Abhängigkeit von den Strahl- und Luftgeschwindigkeiten befriedigend in die übrigen Ergebnisse ein.

2. Strömungsvorgänge im freien Strahl

Die im freien Strahl vorliegenden Geschwindigkeits-, Mengen- und Energieverhältnisse wurden von *Trüpel* [9] und *Zimm* [8] mit Staurohr und Hitzdrahtsonde eingehend experimentell, von *Tollmien* [10] rein theoretisch untersucht. Abb. 10 gibt einen Überblick über die Düsendimensionierung sowie die Größe des untersuchten Geschwindigkeits- und Strahlbereichs. Es lag nahe, die vorliegenden Ergebnisse unter Berücksichtigung der Ähnlichkeitsmechanik auf den Farbspritzvorgang anzuwenden, jedoch ließen die zum Teil grundsätzlichen Unterschiede in den Geschwindigkeitsgrößen (3 bis 88 m/s gegenüber überkritischen Geschwindigkeiten bis zu 450 m/s) und Düsenformen (kreisförmige gegenüber kreisringförmigen Querschnitten) dem Verfasser diesen Weg als unratsam erscheinen. Es wurden also nur die in den Veröffentlichungen angegebenen Rechnungsgänge und Versuchserfahrungen benutzt.

Über einen auf eine Platte aufprallenden Wasserstrahl liegen Versuchsergebnisse von *Reich* [11] vor, die sich jedoch in Anbetracht der Unterschiede der dort untersuchten Verhältnisse kaum verwerten lassen. *Reich* untersucht einen aufprallenden Flüssigkeitsstrahl von ange-

Zahlentafel 2 Übersicht über technische Zerstäubungsversuche

Name des Verfassers	Fachgebiet	Zerstäubungsart	Flüssigkeit	Spritzüberdruck at	Strahl-Geschwindigkeit m/s	Tropfen-Dmr. μ
Kuehn [15]	Dieseleinspritzung	Kompressorlos	Gasöl, Petroleum	4 bis 45	20 bis 300	25 bis 180
Saß [20]	Dieseleinspritzung	Kompressorlos	Gasöl	bis 350	150 „ 400	4 „ 40
Sauter [22]	Vergaseruntersuchung	—	Wasser, Petroleum	—	20 „ 130	4 „ 180
Grosse	Farbzerstäubung	Luftdruckzerstäubung	4 Farbsorten	0,5 bis 4,5	230 „ 450	7 „ 21

nähert zylindrischer Form und angenähert gleicher Geschwindigkeitsverteilung über den Strahlquerschnitt. Ein Ansaugen von Luft in den Strahl hat er nicht beobachtet, während es sich beim Farbspritzen um einen ausgesprochenen Mischungsvorgang der aus der Düse austretenden Zerstäubungsluft mit der Außenluft, kegelförmige Strahlform und ungleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt handelt.

Lewicki [28], *Zerkowitz* [29] und *Schüle* [30] untersuchen die Austrittsgeschwindigkeiten an einfachen Mündungen bei überkritischen Drücken für ausströmenden Dampf und bringen neben Angaben über die Abmessungen des sich vor der Düse ausbildenden Überdruckgebietes einfache durch Versuch bestätigte Formeln für die auftretenden überkritischen Geschwindigkeiten.

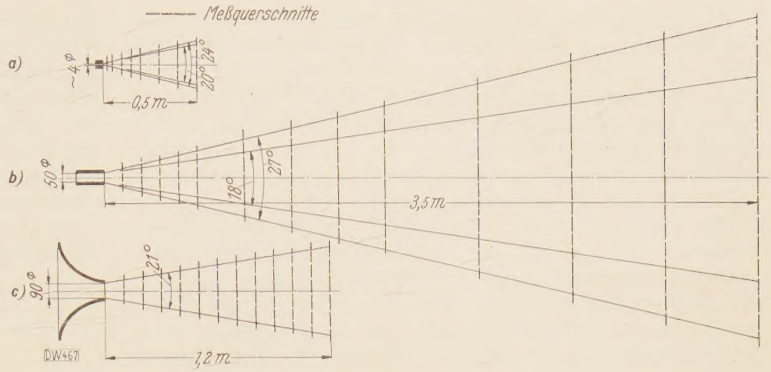


Abb. 10
Übersicht über bereits vorliegende Untersuchungen des freien Strahls
a) Spritzpistole, Luftgeschwindigkeit bei Austritt aus der Düse 230 bis 450 m/s
b) *Zimm*, Luftgeschwindigkeit bei Austritt aus der Düse 3 bis 12 m/s
c) *Trüpel*, Luftgeschwindigkeit bei Austritt aus der Düse 88 m/s

3. Transport- und Ausscheidungsvorgänge kleiner Körper in bewegter Luft

Die Ergebnisse der von *Gasterstädt* [25] angestellten, sehr eingehenden Untersuchungen über den pneumatischen Fördervorgang geben Aufschlüsse über den Schlupf des Fördergutes gegenüber der Transportluft und die Größenordnung der aufzuwendenden Transportarbeit.

Für den eigentlichen Ausscheidungsvorgang wurden weitgehend die von *Sell* [27] und *Albrecht* [26] entwickelten und experimentell nachgeprüften Formeln verwandt. *Sell* untersucht die Staubausscheidung an einfachen, in geschlossenen Filtern eingebauten Prallkörpern (ebene Platte, Kreiszylinder und einfacher Fangkörper) und entwickelt für die Staubausscheidung an diesen Prallkörpern Formeln. Diese Formeln lassen sich auf jedes Strömungsfeld anwenden, in welchem die Teilchengröße, die Größe der Geschwindigkeit und der Strömungsrichtung für jeden Punkt bekannt ist. Der Hauptunterschied dieser Untersuchungen gegenüber der vorliegenden Aufgabe ist wieder darin zu sehen, daß gegenüber dem beim Farbspritzen auftretenden Mischungsvorgang eine Volumenvergrößerung und eine daraus resultierende ungleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung über den Strömungsquerschnitt sowie Turbulenzerscheinungen in den geschlossenen Filtern nicht auftreten können.

Demzufolge sind auch die für zweidimensionale Strömung entwickelten Stromlinienformen, Geschwindigkeits- und Richtungsverteilungen an der Luvseite der Körper auf die vorzunehmende Untersuchung nicht zu übertragen.

E. Versuchseinrichtungen und rechnerische Auswertung der Versuchsergebnisse

1. Grundsätzliche Bemerkungen zu den Versuchen

Der Endzweck der Versuche bestand darin, die für die Film- und Nebelbildung maßgebenden Faktoren qualitativ und quantitativ zu erfassen. Es mußten also Tropfengröße und Regelmäßigkeit der Zerstäubung, Tropfengeschwindigkeit und Strömungsrichtung des Tropfens in jedem Punkte seiner Bahn, sowie Tropfen- und Farbverteilung im Strahl und dem sich bildenden Film gemessen werden. Da es sich hierbei um die Feststellung vollkommen verschiedener Größen, wie Luftgeschwindigkeiten, Strömungsrichtungen, Gewichte, Längenabmessungen, Häufigkeiten usw. handelt, wurden die im folgenden aufgezählten Meß- und Auswertungsverfahren angewandt:

Photographische Aufnahmen und deren lineare Ausmessung zum Ermitteln und Nachprüfen der Strahlkonturen und Düsenvorgänge;

Geschwindigkeitsmessungen mit Staurohr und Manometer zum Feststellen der Luftgeschwindigkeiten im Strahl;

Einbringen von Fadensonden in das Strömungsfeld zum Bestimmen der Strömungsrichtung;

Wägungen zum Ermitteln der Tropfenverteilung im Strahl und der verschiedenen Dicken des sich ausbildenden Films;

Mikroskopische Ausmessung und statistische Auszählung der Tropfengrößen und Tropfenmengen.

Hierbei war dafür Sorge getragen, daß die einzelnen Verfahren einander zum Zwecke der Nachprüfung überdeckten und außerdem dahingehend ergänzten, daß im Falle des Versagens des einen das andere an dessen Stelle trat.

Trotz der Vielzahl der angewandten Versuchsmethoden ist es nicht ohne weiteres möglich, alle Größen, wie z. B. die der Tropfengeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Spritzdruck, ohne Zuhilfenahme weiterer, sehr verwickelter Verfahren wie Zeitlupen- oder Funkenaufnahmen unmittelbar zu bestimmen, so daß man sich dem Ziel auf Umwegen nähern mußte.

Der Gesamtversuchsgang war folgender:

Zunächst wurden in Abhängigkeit vom Spritzdruck die einzelnen Tropfendurchmesser sowie die relative Zahl ihres Vorkommens, die ein Maß für die Gleichmäßigkeit der Zerstäubung bietet, ermittelt.

Die Tropfengeschwindigkeit, die im freien Spritzkegel praktisch gleich der Luftgeschwindigkeit ist, konnte nicht durch Messung im Farbluftstrahl gefunden werden, da sich die empfindlichen Staurohre zusetzten. Es wurde vielmehr die Luftgeschwindigkeit im reinen Luftstrahl bei den der jeweiligen Zerstäubungsfeinheit entsprechenden Luftdrücken gemessen. Diese Drücke entsprechen bei Hinzutreten der gleichfalls von der Luft an der Farbe zu leistenden Zerstäubungs- und Beschleunigungsarbeit im Farbluftstrahl hinsichtlich der Geschwindigkeitsgrößen und -verteilungen nicht den für die Zerstäubung gültigen, sondern bedürfen noch eines Zuschlages, der sich aus der Kenntnis der Energiebilanz ergibt.

Diese erhält man aus den Größen der verbrauchten Luftmengen, des geförderten Farbgewichts, der Zerstäubungsfeinheit sowie der Beschleunigungswege an der Düse, d. h. durchgängig aus versuchsmäßig gefundenen Werten durch einfache Rechnung. Die Tropfenbahnen und Aufschlaggeschwindigkeiten ergeben sich dann rein rechnerisch aus den aus den Geschwindigkeitsmessungen ermittelten und auf wahren Spritzdruck umgerechneten Strömungsfeldern sowie den Tropfengrößen und -massen.

Die Messung der Farbverteilung im Strahl und der sich von der Mitte zu den Rändern hin ändernden Filmdicke, sowie die Filmbreite, deren Begrenzung sich mit dem Ende der Grenzbahnen decken muß, ergeben dann eine versuchsmäßige Kontrolle der durch reine Rechnungen gefundenen Werte. Ferner müssen sich die den Untergrund nicht mehr erreichenden Farbmengen mit den in der Praxis angenommenen Nebelmengen ungefähr decken.

Die Versuche wurden bei fünf verschiedenen Überdrücken: 0,5, 1,5, 2,5, 3,5 und 4,5 at, für die bereits aufgezählten vier Farbsorten durchgeführt. Die Strömungsverhältnisse wurden im freien ausströmenden Strahl (Freistrahl) bis zu einer Strahllänge von 50 cm und im aufprallenden Strahl (Prallstrahl) für eine Wandentfernung von 20 cm, die ungefähr dem praktisch üblichen Pistolenabstand entspricht, ermittelt.

Da bei einem Teil der Versuche, namentlich bei der Tropfenauszählung und der Messung der Farbmengenverteilung im Strahl große Streuungen zu erwarten waren, wurden sie als Großzahlversuche durchgeführt, wobei sich für die einzelnen Versuchsreihen folgende Zahlen ergaben:

Zerstäubungsmessungen:
Mikroskopisches Auszählen von 30 000 Tropfen;
Geschwindigkeitsmessungen:
1600 Ablesungen;
Messung der Farbverteilung im Strahl und der jeweiligen Farbfilmstärken:
1400 Wägungen.

Die Spritzpistole war bei allen Versuchen unter Zwischenschaltung eines Absperrventils, eines Druckminderventils sowie eines Windkessels an die Druckluftleitung der Fabrik angeschlossen, die unter einem angenähert gleichbleibenden Überdruck von 7 at stand. Die Höhe des Spritzdrucks wurde durch das Druckminderventil eingestellt, das ihn dauernd mit Höchstschwankungen von ± 0,02 at konstant hielt. Die Ablesung erfolgte an einem mit 0,01 at-Skala versehenen Manometer, das am Windkessel befestigt war. Der Druck wurde um den jeweiligen Betrag der Leitungs- und Pistolenverluste, Abb. 6, höher eingestellt, so daß an der Düse der volle in den Ergebnissen eingesetzte Druck herrschte.

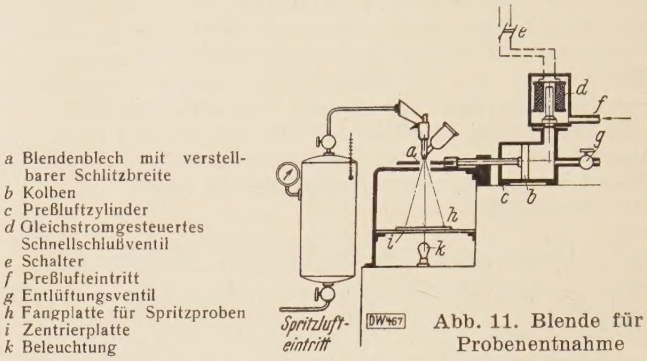
Die Raumtemperatur betrug durchgängig 20°, mit Höchstabweichungen von ± 2°, die Lufttemperatur im Netz lag bei ungefähr 18°.

2. Messung von Tropfengröße und Tropfenhäufigkeit

a) Versuchsverfahren und Versuchsgeräte

Der Tropfendurchmesser wurde derartig bestimmt, daß die Farbe hinreichend dünn auf eine Glasplatte aufgespritzt wurde und die so erhaltenen Aufschlagdurchmesser mikroskopisch ausgemessen und ausgezählt wurden. Mit einer einfachen Umrechnung ergibt sich aus diesen Durchmessern der entsprechende Tropfendurchmesser. Da die durch einfaches Aufspritzen erzielbaren Proben zu dick und zu wenig lichtdurchlässig waren, um mikroskopisch auswertbar zu sein, wurden mittels eines durch Druckluft betätigten Schlitzverschlusses, Abb. 11, ein Teil der Tropfen aus dem stetig spritzenden Strahl herausgefangen.

Hierzu wurde die Pistole in eine auf einem Tisch aufgebaute Blendenapparatur mit Spritzrichtung senkrecht nach unten eingespannt. Das Blendenblech *a*, dessen Schlitzbreite verstellbar war, wurde von dem im Zylinder *c* befindlichen Kolben *b* bewegt. Um eine möglichst schnelle und gleichmäßige Kolbenbewegung zu erhalten, wurde der Drucklufteintritt durch ein gleichstromgesteuertes Ventil *d*, das sich beim Schließen des Schalters *e* schlagartig öffnete, freigegeben, so daß die bei *f* plötzlich eintretende Preßluft den von Hand in die äußerste Totlage zurückgeschobenen Kolben nach vorne treiben konnte. Nach Beendigung des Versuchs wurde der Schalter geöffnet, das Ventil schlug zu und sperrte den Zylinder ab. Dann wurde dieser durch Öffnen des Ventils *g* entlüftet und der Kolben mit Blende wieder in seine Ausgangslage zurückgeschoben. Die anzuspritzende Glasplatte *h* war in einem Abstand von 20 cm genau senkrecht unter der Pistolenmündung angebracht und wurde mittels einer auf der Glasplatte *i* eingeritzten Teilung genau zentriert, was durch die Beleuchtung mit der Glühlampe *k* erleichtert wurde.



a Blendenblech mit verstellbarer Schlitzbreite
b Kolben
c Preßluftzylinder
d Gleichstromgesteuertes Schnellschlußventil
e Schalter
f Preßlufteintritt
g Entlüftungsventil
h Fangplatte für Spritzproben
i Zentrierplatte
k Beleuchtung

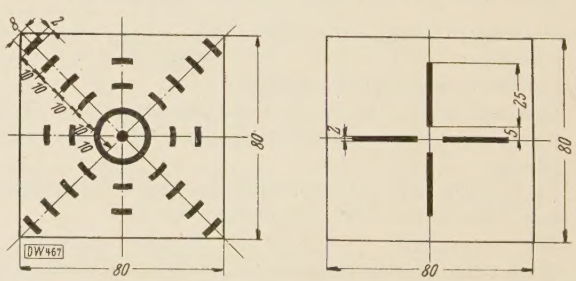
Abb. 11. Blende für Probenentnahme

Das nächstliegende Verfahren, die Tropfen in einer mit der Farbe unmischbaren Flüssigkeit aufzufangen und unmittelbar auszumessen, scheiterte daran, daß es unmöglich schien, bei der gegebenen kolloidalen Farbzusammensetzung Flüssigkeiten zu finden, die keine Entmischungserscheinungen, Ausflockungen usw. aufkommen ließen.

Damit der Mitwind der bewegten Blende die feinen Tropfen nicht verwehte, wurde die Blende unmittelbar unter der Pistole angebracht, wo die Tropfen- gegenüber der Blendengeschwindigkeit sehr hoch ist. Bei den Versuchen wurde zunächst auf das Blendenblech *a* gespritzt, das sich in seiner äußersten Lage befand. Sofort danach wurde der Druckluftkolben betätigt, die Blende eilte an der Pistole vorbei und gab dem Strahl für kurze Zeit, wie in Abb. 11 dargestellt, den Weg zur Probenplatte frei.

Die Anspritzdauer konnte durch Verengung der Blendenöffnung und Steigerung des Luftdrucks bis auf 0,001 s herabgedrückt werden und wurde für die verschiedenen Drücke und Farben je nach Probendicke eingestellt.

Die Fangplatten, Abb. 12 und 13, wurden aus photographischen, von ihrer Emulsion befreiten Glasplatten zurechtgeschnitten. Sie trugen, um eine gewisse Planmäßigkeit in die Auszählungen hineinzubringen, auf ihrer Unterseite Markierungen. Die Messung und Auszählung erfolgte nur innerhalb dieser Felder, deren Abmessungen aus Abb. 12 und 13 hervorgehen. Bei niedrigen Drücken und zähen Farben, d. h. bei großen Tropfendurchmessern, durften nur wenige Tropfen die Unterlage erreichen, damit sie nicht zusammenliefen. Deshalb wurden die Zählfelder zur Erleichterung der mikroskopischen Auswertung zusammenhängender und größer ausgebildet als beim Spritzen mit hohem Druck.



hoher Spritzdruck — niedriger Spritzdruck

Abb. 12 und 13. Fangplatte für Spritzproben

Zum Mikroskopieren stand ein sonst zur Untersuchung von Metallschliffen benutztes Martens-Metallstativ (Carl Zeiß, Jena) zur Verfügung. Die Proben wurden in auffallendem und durchfallendem Bogenlampenlicht untersucht. Die Optik hatte für den vorliegenden Fall zur Erzielung einer möglichst großen Tiefenschärfe nur eine 130 fache Eigenvergrößerung, stärkere Vergrößerungen wurden durch Projektion auf die Mattscheibe der am Mikroskop befindlichen Kamera erreicht.

Die Mattscheibe trug ein mit hartem Bleistift aufgetragenes Netz mit bekannten Abständen der Einzellinien, so daß Tropfendurchmesser und -anzahl ohne weitere Zwischenmessungen ermittelt werden konnten. Die Tropfen erschienen auf der Mattscheibe doppelt so groß, wie in Abb. 59 bis 76, Taf. V bis VIII gezeigt, gestatteten also genauere und den Beobachter weniger anstrengende Messungen als bei Anwendung des Okularmikrometers.

Zur Feststellung der Höhe der Einzelaufschläge, die für die Umrechnung von Aufschlag- auf Tropfendurchmesser erforderlich ist, wurde einmal auf den Untergrund, das andere Mal auf die Aufschlagkuppe scharf eingestellt und die Differenz am Feintrieb des Mikroskops abgelesen.

b) Rechnerische Auswertung

Unter der Annahme, daß der aufgeschlagene Tropfen vom Halbmesser r die Gestalt eines Rotationsellipsoids mit den Halbachsen R und a angenommen hat, ergibt sich infolge der Identität dessen Volumens mit dem Tropfenvolumen die Gleichung

$$\frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{1}{2}\cdot\frac{4}{3}\pi R^2 a \quad \ldots\ldots (1).$$

Dann wird

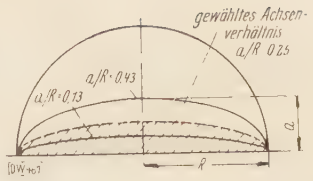
$$r^3 = R^2 a/2.$$

Setzt man das Achsenverhältnis $a/R = c$, Abb. 14, und ermittelt r in Abhängigkeit von R und c, so ist

$$r = R\sqrt[3]{c/2} \quad \ldots\ldots (2).$$

Das mittlere mikroskopisch ermittelte Achsenverhältnis

Abb. 14
Aufschlags - Rotationsellipsoide mit verschiedenen Achsenverhältnissen



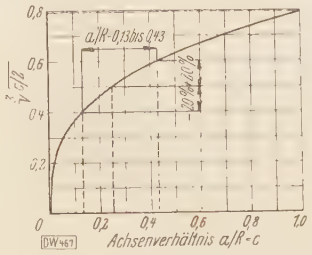


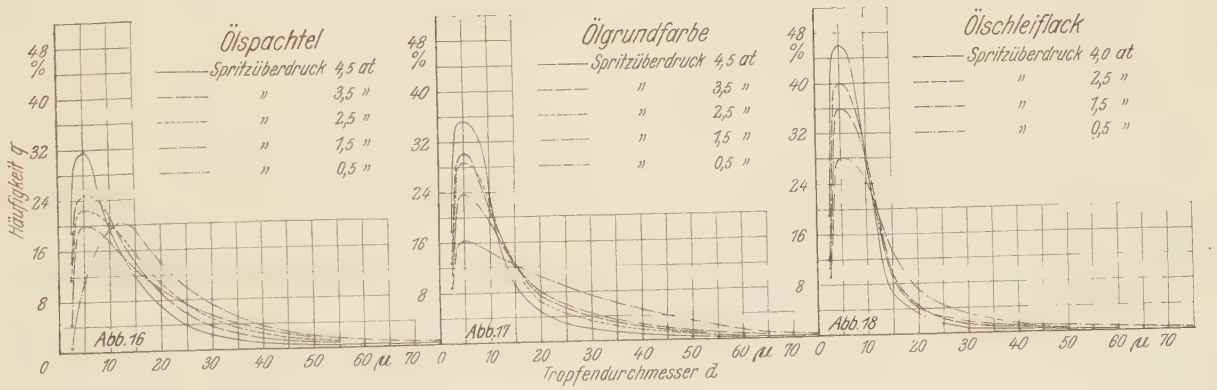
Abb. 15
Umrechnungsfaktor $\sqrt[3]{c/2}$ in Abhängigkeit vom Achsenverhältnis $a/R = c$

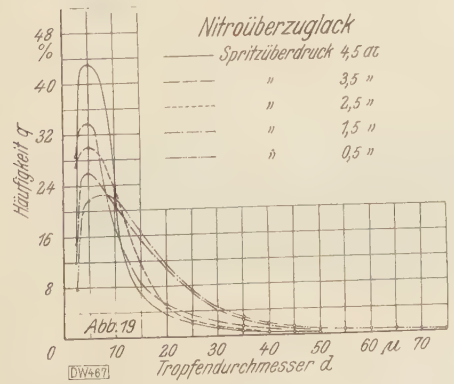
liegt für alle Drücke und Farbsorten bei rd. 0,25, was einem Umrechnungsfaktor $\sqrt[3]{0{,}125} = 0{,}5$ entspricht.

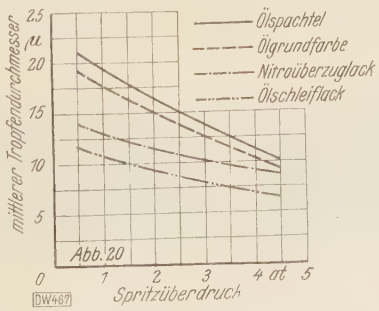
Aus dem Diagramm, Abb. 15, worin $\sqrt[3]{c/2}$ in Abhängigkeit von c aufgetragen ist, ergibt sich, daß selbst bei beträchtlichen Änderungen des Achsenverhältnisses von 0,13 bis 0,43, die praktisch nicht erreicht werden, der Umrechnungsfehler nicht mehr als rd. 20 % beträgt.

Um ein Maß für die Gleichmäßigkeit der Zerstäubung zu erhalten, werden Häufigkeitskurven, Abb. 16 bis 19, Taf. I, aufgestellt, die bei gegebenem Spritzdruck den Anteil der einzelnen Tropfengrößen an der Gesamttropfenzahl in Hundertteilen aufweisen. Der jeweilige Anteil q_1, q_2, q_n ergibt sich, wenn n_1, n_2, n_n Tropfen mit den Durchmessern d_1, d_2, d_n auftreten, zu

$$\left.\begin{aligned} q_1 &= \frac{n_1}{\Sigma n}\,100 \\ q_2 &= \frac{n_2}{\Sigma n}\,100 \\ q_n &= \frac{n_n}{\Sigma n}\,100 \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots (3).$$







Tafel I

(Abb. 16 bis 19)
Häufigkeitskurven

Abb. 20. Mittlerer Tropfendurchmesser in Abhängigkeit vom Spritzdruck

Die Gleichmäßigkeit ist um so größer, je weniger verschiedene Tropfendurchmesser auftreten oder aber bei gleicher Größenanzahl, je ausgeprägter das Maximum der Kurven ist.

Der mittlere Tropfendurchmesser, Abb. 20, Taf. I, ergibt sich, wenn man ihn auf die gleiche Anzahl bezieht, mit denselben Bezeichnungen wie oben für den entsprechenden Spritzüberdruck zu

$$d_m = \frac{n_1 d_1 + n_2 d_2 + \dots n_n d_n}{n_1 + n_2 + \dots n_n} \quad \dots (4).$$

Die im vorliegenden Fall ausgewertete Tropfenanzahl betrug insgesamt ungefähr 30 000, für jeden Spritzüberdruck und jede Farbe je rd. 1500, bei Bildung des mittleren Durchmessers wurden die Tropfen, deren Anzahl unter 1 % der Gesamtsumme lag, vernachlässigt.

3. Untersuchung der Vorgänge an der Düse

a) Versuchsverfahren

Da eine Messung der Luftgeschwindigkeiten wegen der zu erwartenden Größen sowie der kleinen Düsenabmessungen unmittelbar an der Austrittstelle nicht in Frage kam, mußte man sie aus der Kenntnis der austretenden Luftmengen rechnerisch bestimmen. Hierbei wurde so vorgegangen, daß durch Vergleich der gemessenen und der theoretisch austretenden Luftmengen die Verlustzahlen μ und φ (s. unter 3 b) der Düse bestimmt und dann die eigentlichen Luftgeschwindigkeiten berechnet wurden.

Der Luftverbrauch G der Pistole wurde mittels Behältermessung innerhalb der Grenzen von 1,0 bis 4,5 at-Überdruck ermittelt, der Luftverbrauch bei 0,5 at-Überdruck nach der in Abb. 6 gefundenen Kurve extrapoliert. Der diesem Druck entsprechenden Geschwindigkeit wurde derselbe Wert von φ wie den übrigen Geschwindigkeitsrechnungen zugrunde gelegt.

b) Rechnerische Ermittlung der Luftgeschwindigkeiten beim Austritt

Auf ausführliche Rechnungswiedergabe sei, weil es sich um durchgängig bekannte Rechnungen handelt, verzichtet; es werden lediglich die zugrunde gelegten Formeln nach *Schüle* [30] aufgezählt, das Endergebnis wird in Zahlentafel 3 wiedergegeben. Die so ermittelten Geschwindigkeitsgrößen fügen sich nach Abb. 26 sowie Abb. 37 und 44, Taf. II und III, gut in die mit dem Staurohr bis zu einem Abstand von 2 cm von der Düse ermittelten Werte ein.

G gemessenes Luftgewicht [kg/s],
G_0 theoretisches Luftgewicht [kg/s],
p_1 abs. Luftdruck in der Pistole [at],
p_m abs. Mündungsdruck [at] $0{,}528\,p_1$,
p_0 abs. Außendruck [at],
v_0 Unterkritische Luftgeschwindigkeit bei praktischer Düse [m/s],
v_k Kritische Luftgeschwindigkeit bei praktischer Düse [m/s],
v_{max} Höchstgeschwindigkeit im Strahl [m/s],
F Düsenfläche [cm²],
R Gaskonstante der Luft [m/°C],
T_i Lufttemperatur in der Pistole $= 273 + 18 = 291°$ abs,
T adiabatische Endtemperatur bei Expansion auf Mündungsdruck [° abs],
h Wärmegefälle bei adiabatischer Expansion auf Mündungsdruck [kcal/kg],
c_p spezifische Wärme der Luft [kcal/kg °C],
g Erdbeschleunigung $= 9{,}81$ [m/s²].

Theoretisch austretendes Luftgewicht

$$G_0 = \frac{2{,}15\,F\,p_1}{\sqrt{R\,T_i}} \quad \dots (5).$$

Mengenkoeffizient

$$\mu = \frac{G}{G_0} \quad \dots (6).$$

Beziehung zwischen μ und φ:

$$\mu = \frac{\varphi}{1 + \frac{(1 - \varphi^2)\,h}{c_p\,T}} \quad \dots (7).$$

Kritische Geschwindigkeit v_k bei ausgeführter Düse:

$$v_k = \varphi\, 3{,}38 \sqrt{R\,T_i} \quad \dots (8).$$

Überkritische Geschwindigkeit im freien Strahl:

$$v_{max} = v_k + \frac{F\,(p_m - p_0)}{G}\,g \quad \dots (9).$$

Ausströmungsgeschwindigkeit bei ausgeführter Düse:

$$v_0 = \varphi\, 44{,}8 \sqrt{T_i\,[1 - (p_0/p_1)^{0{,}286}]} \quad \dots (10).$$

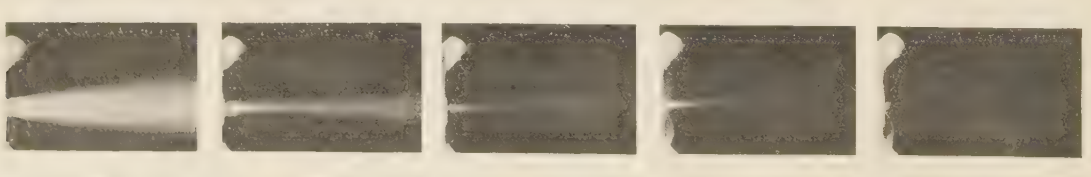
Zahlentafel 3

Luftgeschwindigkeiten beim Austritt aus der Düse

Luftdruck abs. p_1	Theoret. Luftgewicht G_0	Gemessenes Luftgewicht G	μ		φ	Krit. Luftgeschwindigkeit v_k	Höchstgeschwindigkeit v_{max}
at	kg/s	kg/s				m/s	m/s
1,5						$v_0 = 231$	
2,0	0,00168	0,00146	0,87				
2,5	0,00210	0,00197	0,94	0,92	0,91		342
3,5	0,00294	0,00282	0,96			284	391
4,5	0,00378	0,00354	0,93				422
5,5	0,00462	0,00422	0,91				445

Das Eintreten der Farbe in den Luftstrahl, s. Abb. 2 und 3, wurde photographisch nach den vergrößert projizierten Negativen ausgemessen, Abb. 21 und 22. Nach längerem Probieren mit verschieden gefärbten Farbsorten und Hintergründen ergaben sich als günstigste photographische Medien ein wasserheller Terpentinersatz der Firma Kurt Böhm, Berlin, vor einem wolligen, schwarzen Futterstoff als Hintergrund. Wie sich aus Abb. 22 ergibt, tritt bei gleichbleibender Luft- und wachsender Farbmenge die Farbe in Anlehnung an die zwischen Luft- und Farbdüse gelegene ringförmige Fläche immer tiefer in den Strahl hinein. Sie bildet um den Unterdruckraum herum eine zungenförmige Zone mit stärkerer Tropfenkonzentration als im übrigen Strahl. Diese Zungenform läßt einen Stromlinienverlauf, wie er in Abb. 2 und 3 schematisch gezeichnet ist, vermuten.

Gleichzeitig ist es wahrscheinlich, daß durch diese Konturen, innerhalb derer eine Verdünnung der unmittelbar an den Düsenrändern vorhandenen Luft-Farbtropfen-Konzentration durch in den Strahl hineingesaugte Außenluft noch nicht eingetreten ist, ein Überdruckgebiet begrenzt wird. In diesem findet bei überkritischen Spritzdrücken die Nachexpansion der Luft, die am Düsenaustritt noch einen höheren als den Atmosphärendruck aufweist, bis auf Außendruck statt.



$n = 1$ $n = {}^{3}/_{5}$ $n = {}^{2}/_{5}$ $n = {}^{1}/_{5}$

Abb. 21. Photographische Aufnahme des Strahls unmittelbar an der Düse

$$n = \frac{\text{tatsächlich geforderte Farbmenge}}{\text{größtmögliche Farbmenge}}$$

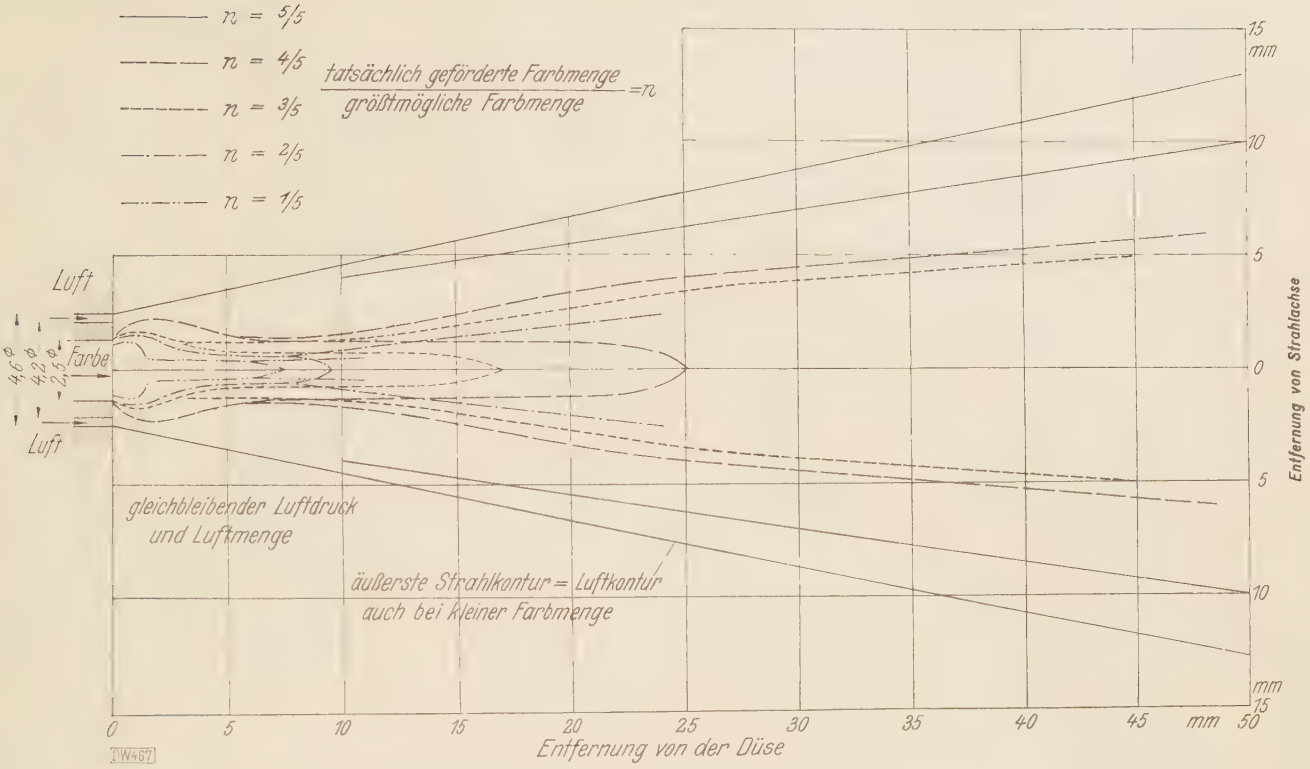


Abb. 22. Ausmessung der Farbbahnen nach Abb. 21

Über dieselben Beobachtungen wird bei *Lewicki* [28], *Zerkowitz* [29] und *Schüle* [30] berichtet. Hier tritt gleichfalls bei überkritischem Druck ein Dampfstrahl aus einfacher Mündung, d. h. mit höherem Mündungsdruck als Gegendruck, in freie Luft aus. Die sich im Inneren des Strahles ausbildende Überdruckzone mit derselben Begrenzung, wie im vorliegenden Falle beobachtet, ist vollkommen klar, also mit nicht kondensiertem Dampf angefüllt, während im Außengebiet der Dampf infolge weitergehender Expansion bis auf Atmosphärendruck und Hineinsaugens kalter Luft kondensiert, so daß der Strahl getrübt erscheint.

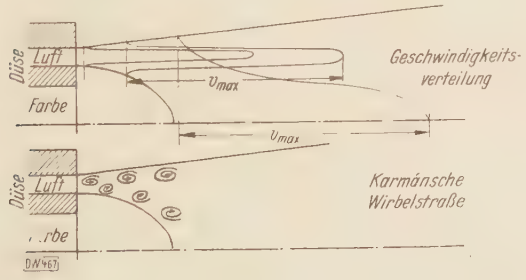


Abb. 23 und 24. Schema der Vorgänge an der Düse

Die beobachteten Erscheinungen, die durch ungleichmäßige Geschwindigkeitsverteilungen über die einzelnen Querschnitte, Abb. 23, die wahrscheinliche Bildung von *Karmán*schen Wirbelstraßen in den äußeren Zonen, Abb. 24, sowie stehende Schwingungen noch weiter verwickelt werden, lassen es als aussichtslos erscheinen, den Zerstäubungsmechanismus sowie die Beschleunigungsvorgänge ohne Zuhilfenahme wesentlich verwickelterer Versuchseinrichtungen, wie etwa der Zeitlupe, vollkommen genau zu erfassen.

Es werden also unter Benutzung der durch Versuch bekannten Größen Näherungswege für die Ermittelung der Zerstäubungs- und Beschleunigungsarbeiten eingeschlagen.

4. Aufstellung der Energiebilanz

Die aus der Pistole ausströmende Luft gibt die ihr innewohnende Anfangsenergie L_0 auf ihrem Wege durch die Düse bis zur Wand als nachstehend aufgeführte Arbeiten ab:

- L_v Verlustarbeit in der Düse,
- L_F Saugarbeit zum Ansaugen der Farbe,
- L_z Zerstäubungsarbeit,
- L_b Beschleunigungsarbeit an der zerstäubten Farbe,
- L_s Saugarbeit im freien Strahl zum Ansaugen der Außenluft + Beschleunigungsarbeit an der eingesaugten Luft + Transportarbeit an den Farbtröpfchen.

Die Energiegleichung lautet dann:

$$L_0 - L_v - L_F - L_z - L_b - L_s = 0 \quad \ldots (11).$$

Mit den Formelgrößen in Abschnitt 3b, und wenn bedeutet:

$v_{0\max}$ die theoretische höchste Luftgeschwindigkeit im Strahl [m/s],
Q das Farbgewicht [kg/s],
v_D die Farbgeschwindigkeit in der Düse [m/s],
α die Kapillarkonstante kg/m],
ΔO die Oberflächenvergrößerung nach der Zerstäubung [m²/kg],
v_F die Höchstgeschwindigkeit der Farbe im Strahl [m/s],

sowie

$\mu = G\ G_0 \approx \varphi \approx 0{,}92$,

$v_{0\max} \approx v_{\max}$ infolge der ermittelten Größenordnung von φ und μ,

ist

$$L_0 = \frac{G_0}{g}\frac{v_{0\max}^2}{2} \quad \ldots (12),$$

$$L_v = \frac{G_0}{g}\frac{v_{0\max}^2}{2} - \mu\frac{G_0 v_{\max}^2}{g} = \frac{G_0}{g}\frac{v_{\max}^2}{2}(1-\mu) \quad (13),$$

$$L_F = \frac{Q}{g}\frac{v_D^2}{2} \quad \ldots (14),$$

$$L_z = Q\,\alpha\,\Delta O \quad \text{(nach } \textit{Triebnigg} \text{ [24])} \quad \ldots (15),$$

$$L_b = \frac{Q}{g}\frac{v_F^2}{2} \quad \ldots (16).$$

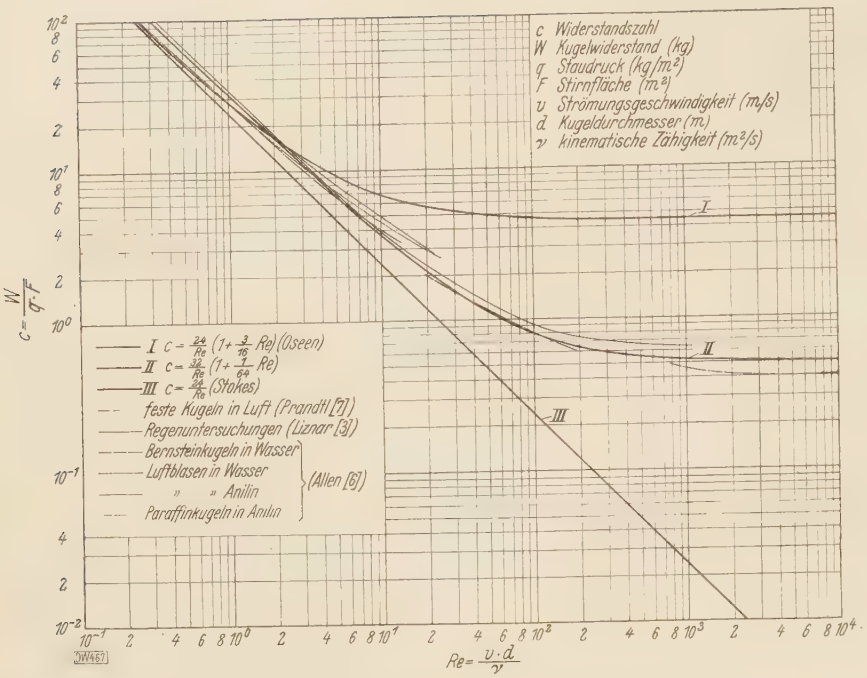


Abb. 25. Widerstandszahl von Kugeln in Abhängigkeit von der Reynoldsschen Kennzahl

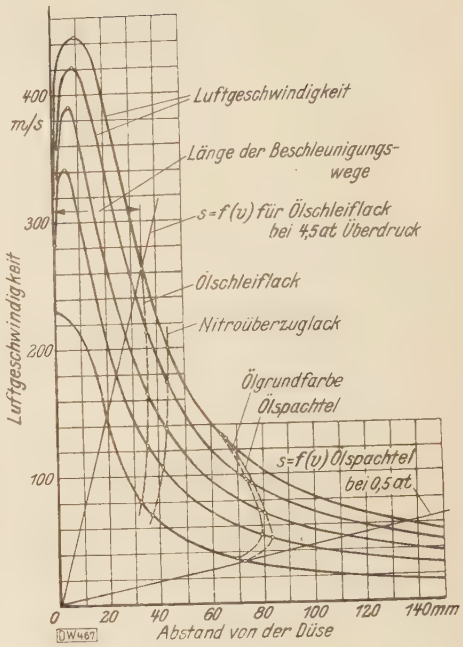


Abb. 26. Länge der Beschleunigungswege

Von diesen Arbeiten kann die Saugarbeit der Farbe L_F wegen der geringen Farbgeschwindigkeit gegenüber der austretenden Luft (2,1 m/s höchste Farbgeschwindigkeit gegenüber 284 m/s Luftgeschwindigkeit an der Düsenmündung) sowie die Zerstäubungsarbeit L_z vernachlässigt werden. L_z beträgt, wenn man wegen der Unbestimmbarkeit der Kapillarkonstanten für pigmentierte Farben die Konstante für Wasser mit 0,0075 kg/m (α für Benzol = 0,0026 kg/m, α für Olivenöl = 0,0034 kg/m) sowie die Oberflächenvergrößerung entsprechend der feinsten Zerstäubung bei Ölschleiflack mit 925 m²/kg annimmt

$$L_z = Q\,\alpha\,\Delta O = 0{,}0035 \cdot 0{,}0075 \cdot 925 = 0{,}0242 \text{ mkg/s},$$

d. h. bei 4,5 at Luftüberdruck 0,05 % der Luftenergie.

Die Energiegleichung lautet dann vereinfacht

$$L_0 - L_r \quad L_b - L_s \quad 0 \quad \ldots\ldots (17);$$

$$\frac{G_0}{g}\frac{v_{max}^2}{2} - \frac{G_0}{g}\frac{v_{max}^2}{2}(1-\mu) - \frac{Q}{g}\frac{v_F^2}{2} - L_s = 0 \quad (18).$$

Die ideale Luftenergie läßt sich aus den gegebenen Drücken und Düsenabmessungen, die Reibungsarbeit aus dem tatsächlichen Luftverbrauch der Pistole berechnen, während für die Feststellung der Beschleunigungsarbeit zwar die Farbmenge, nicht aber die einzusetzende Farbgeschwindigkeit gegeben ist. Die Saugarbeit im freien Strahl ergibt sich nach Ermittlung dieser Größen dann als Restbetrag.

Entscheidend für die Beschleunigungsverhältnisse sind neben der durch Versuch bekannten Tropfenmasse die Zustände im Strömungsfeld sowie der Tropfenwiderstand. Ist W [kg] die Widerstandskraft des Tropfens, F [m²] die der Strömung zugekehrte Ansichtsfläche, q [kg/m²] der Staudruck und γ das spezifische Luftgewicht [kg/m³], so gilt

$$q = \frac{v^2\gamma}{2g} \quad \ldots\ldots\ldots (19),$$

$$W = c\,q\,F \quad \ldots\ldots\ldots (20).$$

Die in dieser Formel enthaltene dimensionslose Widerstandszahl c ist mit der Reynoldsschen Zahl veränderlich und beträgt [7] nach

$$Stokes: \quad c = 24/Re,$$

$$Oseen: \quad c = \frac{24}{Re}\left(1 + \frac{3}{16}Re\right).$$

Hierin bedeutet: $Re = v\,d/\nu$ die Reynoldssche Zahl, d den Kugeldurchmesser [m], v die Strömungsgeschwindigkeit [m/s], ν die kinematische Gaszähigkeit [m²/s].

Wie aus Abb. 25 hervorgeht, gelten diese Werte mit befriedigender Annäherung nur für Werte von Re, die kleiner als 10 sind. Die vorliegenden Versuchsbedingungen ergeben jedoch unter Einsetzung der durch Versuch ermittelten Tropfendurchmesser und Luftgeschwindigkeiten an der Düse für die Kennzahl Werte, die bis auf 450 ansteigen. An dieser Stelle betragen die Abweichungen beider Gesetze von den hier bereits geltenden *Prandtl*schen [7] Zahlen ungefähr ± 1000 %, so daß nach besseren Werten gesucht werden muß. Diese ergeben sich durch Umrechnung der von *Liznar* [3] und *Allen* [6] für die Fallgeschwindigkeit von Kugeln und Tropfen in verschiedenen Medien gefundenen Werte auf die Funktion $c = f(R)$. Legt man durch diese und die *Prandtl*schen Werte eine mittlere Kurve, so gehorcht diese ungefähr dem Gesetz

$$c = \frac{32}{R}\left(1 - \frac{1}{64}R\right) \quad \ldots\ldots (21).$$

Trotzdem wurde in Anbetracht der Tatsache, daß die Rechnungen wegen der Unübersichtlichkeit der Strömungsverhältnisse an der Düse nur überschläglich durchzuführen sind und daß weiterhin die Beschleunigungsarbeiten nur einen verhältnismäßig kleinen Prozentsatz der Gesamtenergie (rd. 20 %) ausmachen, für die Länge der Beschleunigungswege die Stokessche Beziehung benutzt.

Unter Anwendung des Impulssatzes

$$-m\,dv = W\,dt \quad \ldots\ldots (22),$$

worin nach *Stokes* der Tropfenwiderstand $W = 6\pi r\eta v$ ist und

m die Tropfenmasse [kg s²/m], v die Tropfengeschwindigkeit [m/s], t die Zeit [s], η die Luftzähigkeit [kg s/m²], r den Kugelhalbmesser [m], s die Länge des Beschleunigungsweges [m]

bedeutet, ergibt sich nach zweimaliger Integration nach *Sell* [27]:

$$s = \frac{m}{6\pi r\eta}v \quad \ldots\ldots (23).$$

Hiermit ist s bei gleichen Tropfenabmessungen eine von v abhängige lineare Funktion, wobei s mit zunehmendem v

wächst. Trägt man diese wie in Abb. 26 in das durch Messung und Versuch ermittelte Weg-Geschwindigkeits-Diagramm der ausströmenden Luft ein, so schneiden die ermittelten Geraden die Geschwindigkeitskurven in durch Überdruck und Tropfengröße jeweils bestimmten Punkten. In diesen hätte der Tropfen unter Voraussetzung gleichmäßiger Luftgeschwindigkeit diese erreicht, die so ermittelten Geschwindigkeiten werden in die Düsengleichung eingesetzt, womit die Beschleunigungsarbeit errechenbar wird.

Die für diesen Posten in der Energiebilanz eingesetzten Werte sind Mittelwerte für die vier untersuchten Farbsorten; die Höchstwerte weichen je nach Tropfengröße, Tropfenmasse und Geschwindigkeit nach oben und unten um $\mp$ 25 % ab.

Aus den im Diagramm eingetragenen Kurven ergibt sich dann aus der Forderung, daß die Energie der strömenden Luft hinter der Beschleunigungszone in beiden Fällen die gleiche sein muß, durch eine einfache Hilfskonstruktion innerhalb der Energiebilanz, Abb. 27, der Zuschlag, der zu dem bei den Strömungsmessungen in reiner Luft zugrunde gelegten Drücken zu machen ist, um die Strömungsvorgänge vom reinen Luftstrahl auf den Luft-Farb-Strahl übertragen zu können.

Es entsprechen

$p = 4{,}5$ at	Luftüberdruck	....	$p_s = 5{,}6$ at	Spritzüberdruck,
$p = 3{,}5$ „	„	....	$p_s = 4{,}2$ „	„ ,
$p = 2{,}5$ „	„	....	$p_s = 2{,}8$ „	„ ,
$p = 1{,}5$ „	„	....	$p_s = 1{,}6$ „	„ ,
$p = 0{,}5$ „	„	....	$p_s = 0{,}6$ „	„ .

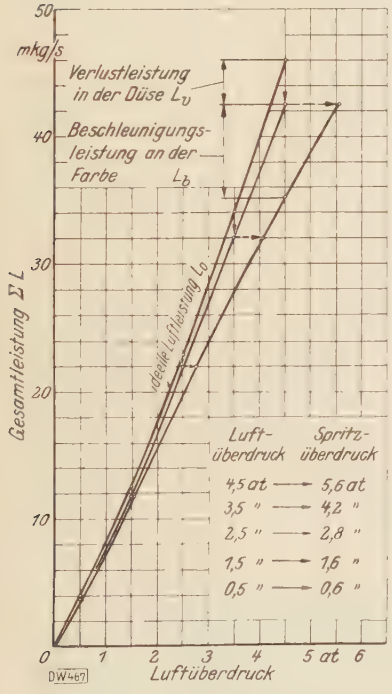


Abb. 27. Energiebilanz

5. Geschwindigkeits- und Mengenmessung im Strahl

a) Meßgeräte und Versuchsverfahren

Zur Geschwindigkeitsmessung innerhalb des Luftstrahls wurden die in Abb. 28 und 29 gezeigten Staurohre benutzt. Sie waren aus dünnen nach der Einspannstelle hin stärker bemessenen Messingrohren zusammengesetzt und hart verlötet. Staurohr, Abb. 28, diente zu Messungen im freien Strahl, Staurohr, Abb. 29, war, weil die Messungen im aufprallenden Strahl zur Kontrolle der Strömungsrichtung eine Drehung des Staurohrs erforderlich machten, der-

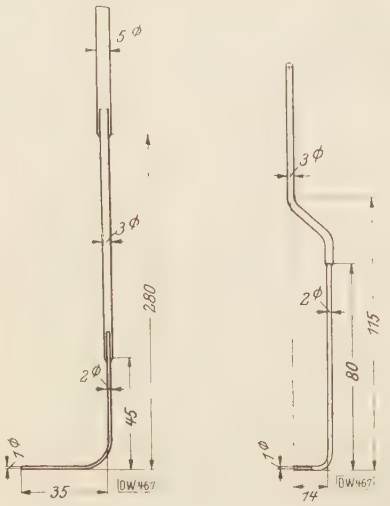


Abb. 28 (links) Gerades Staurohr für Messungen im freien Strahl

Abb. 29 (Mitte) Gekröpftes Staurohr für Messungen im aufprallenden Strahl

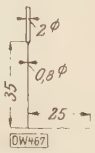


Abb. 30 (unten) Fadensonde

artig gekröpft, daß bei Drehung um die Schaftachse die eigentliche Meßöffnung an derselben Stelle stehen blieb. Die Ausbildung der Rohre als *Prandtl*sche Staurohre zur Trennung des statischen und dynamischen Druckes verbot sich infolge der zu geringen Strahlabmessungen; auch konnte, ebenfalls aus Platzgründen, die in den „Regeln für Leistungsversuche an Ventilatoren und Kompressoren" vorgeschriebene Entfernung zwischen Schaft und Meßöffnung nicht eingehalten werden. Es ergab sich jedoch bei Vergleich mit geeichten Instrumenten in dem mir entgegenkommenderweise zur Verfügung gestellten Windkanal der Technischen Hochschule Berlin, daß ein Abweichen der Anzeigen nicht festzustellen war und auch bei Drehung um die Schaftachse ein Absinken des gemessenen Staudrucks erst bei 8°, also fast wie bei Normalrohren, eintrat.

Die Messung der Staudrücke wurde in dem sehr großen zu untersuchenden Geschwindigkeitsbereich, der zwischen 400 und 2 m/s lag, jeweilig mit quecksilber- oder alkoholgefülltem U-Rohr oder einem Mikromanometer normaler Bauart mit Alkohol als Meßflüssigkeit vorgenommen.

Die Staurohre waren, um jeden Punkt des Strömungsfeldes erreichen und genau bestimmen zu können, in einen mittels Triebschrauben längs- und querbeweglichen Arm eines feststehenden Ständers eingespannt. Hierbei konnten die Verschiebungen mit zwei an dem Zentralschlitten neben den Triebschrauben angebrachten Nonien und die Drehung an einem Winkelmesser mit halbgradiger Teilung abgelesen werden. Infolge der verhältnismäßig großen freien Längen des Ständers und der Rohre war es immer möglich, die Vorrichtung so anzubringen, daß eine Störung der Strömung nicht eintreten konnte.

Abb. 31 zeigt ihre Anbringung im aufprallenden Strahl; die Verteilung der Meßstellen innerhalb des freien und aufprallenden Strahles geht aus Abb. 32 und 33 hervor. Die Richtung der Staurohre war im freien sowie dem kegelförmigen Teil des aufprallenden Strahls parallel zur Achsrichtung, in der abfließenden Luft standen sie parallel zur Wand. Die spätere Entwicklung der Stromlinien zeigt, daß sich deren Winkelstellung zur Strahlachse und zur Wand mit Ausnahme der äußersten Turbulenzzonen innerhalb des brauchbaren Staurohrmeßwinkels hielt.

Die Messungen, die bei Überdrücken von 0,5, 1,5, 2,5, 3,5 und 4,5 at erfolgten, wurden derartig vorgenommen, daß bei feststehendem Staurohr der Druck mit dem zwischen Windkessel und Fabrikleitung geschalteten Druckminderventil um den jeweiligen Betrag erhöht oder erniedrigt wurde, so daß das Staurohr erst nach Erledigung aller für den betreffenden Punkt notwendigen Messungen weiterbewegt wurde.

Meßtechnische Schwierigkeiten infolge starker Druckschwankungen und offensichtliche Fehlanzeigen ergaben

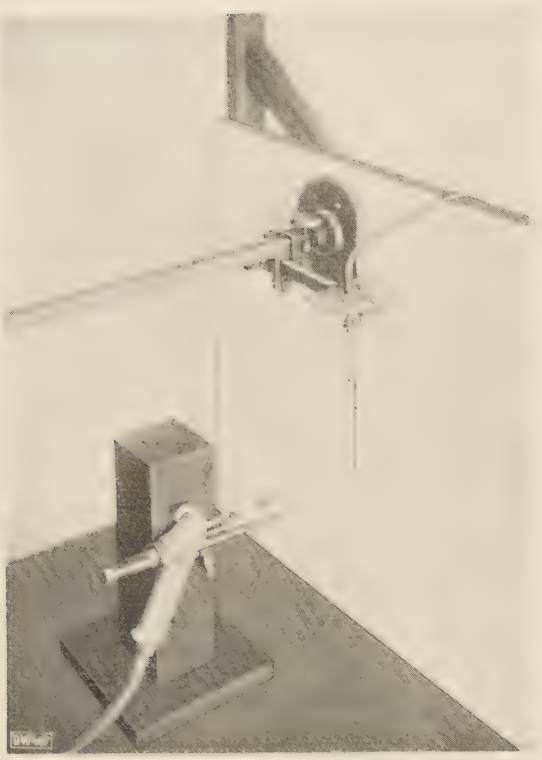


Abb. 31. Anordnung des Staurohrs im aufprallenden Strahl

sich namentlich in der Umlenkzone des aufprallenden Strahles sowie in dem Turbulenzgebiet der längs der Wand abströmenden Luft. Wegen der großen Schwierigkeiten, Geschwindigkeiten in scharf gekrümmten Strombahnen zu messen, wurde auf Messung innerhalb dieses Gebietes verzichtet. Vielmehr wurden durch entsprechende Verschiebung des Staurohrs für die verschiedenen Abstände von der Strahlachse oder der Wand lediglich die Punkte ermittelt, bei denen das Staurohr auf Drehung in die vermutliche Strömungsrichtung durch Wachsen des angezeigten Druckes ein Abweichen von der bis zu dieser Stelle eingehaltenen Richtung anzeigte, Abb. 33. Für die Auswertung wurden die Stromlinien dann nicht mehr auf Grund von Meßergebnissen konstruiert, sondern erst nach Annahme ergänzt und, wie nachstehend beschrieben, berichtigt.

Als vollkommen unmöglich infolge stärkster Druckschwankungen bis ungefähr 400 % erwies sich die Geschwindigkeitsmessung in dem Turbulenzgebiet der abfließenden Luft. Um wenigstens angenähert die Stromlinienrichtung und die Begrenzung feststellen zu können, wurde die Strömungsrichtung durch Einbringung einer Fadensonde, Abb. 30, die aus einem an einem Stiel befestigten dünnen Seidenfaden bestand, in das Feld festgestellt. Die auf diese Weise ermittelten Ausschläge lassen es als wahrscheinlich erscheinen, daß neben der Umlenkung die Richtung der in den Strahl einströmenden Außenluft die Hauptursache für die Verstärkung der Wirbelung gegenüber dem kegelförmigen Strahlteil bildet. Die eingesaugte Außenluft, die sich in einer unter ungefähr 45° gegen die Strahlachse geneigten Richtung bewegt, nähert sich dem kegelförmigen Teil ungefähr in Richtung der strömenden Luft, während sie der abfließenden Luft entgegen ihrer Stromrichtung zufließt, Abb. 33.

Die so ermittelten ungefähren Strahlkonturen werden durch die in Abb. 34 gezeigten, nach ihren vergrößert projizierten Negativen ausgewerteten Photographien kontrolliert, jedoch muß hierbei mit einer Toleranz für die Konturverschiebung von ± 3 mm gerechnet werden.

b) Rechnerische Ermittlung der Geschwindigkeits- und Mengengrößen im Strahl

Das strömungstechnische Endziel der vorliegenden Aufgabe, die Ermittlung der Aufschlaggeschwindigkeiten der Tropfen und die zahlenmäßige Bestimmung der entstehenden Nebelmengen macht die Berechnung und Konstruktion der im Strahl strömenden Luftmengen, der Stromlinien sowie der Linien gleicher Geschwindigkeit und Neigung notwendig.

Die durch einen kreisringförmigen, unendlich schmalen Querschnitt, der als senkrecht zur Strömungsrichtung und konzentrisch zur Strahlachse liegend angenommen wird, in 1 s strömende Luftmenge V [m³/s] ergibt sich aus der Beziehung [8, 9]

$$\mathrm{d}V = 2\,\pi\,r\,v\,\mathrm{d}r \quad \ldots\ldots\ldots (24),$$

worin r den Strahlhalbmesser [m] und v die Strömungsgeschwindigkeit [m/s] bedeutet.

Die Integration ergibt dann das im Inneren eines Kreises vom Halbmesser r strömende Luftvolumen zu

$$V = 2\,\pi \int_{r=0}^{r=r} v\,r\,\mathrm{d}r \quad \ldots\ldots\ldots (25).$$

Trägt man also nach versuchsmäßiger Ermittlung der Geschwindigkeitskurve v über r als Abszisse auf und bildet die Funktion $v\,r$ in Abhängigkeit von r, so ergibt deren Integralkurve die Menge und Mengenverteilung für den betreffenden Querschnitt. Abb. 35 zeigt die Durchführung dieser Rechnung für einen aus den Versuchen beliebig herausgegriffenen Druck und Querschnitt.

Im Gebiet der abfließenden Luft gelten für das Luftvolumen, das durch ein konzentrisch zur Strahlachse gelegenes, auf der Wand senkrecht stehendes Zylinder-

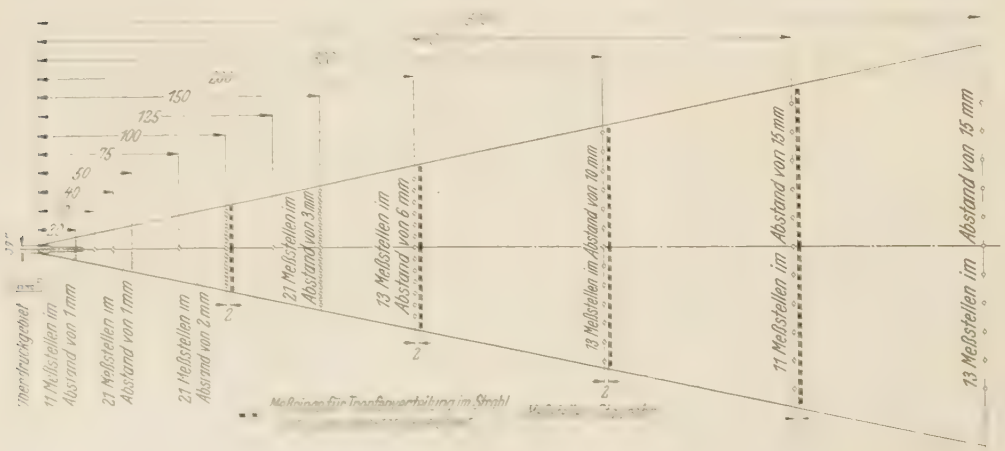


Abb. 32. Verteilung der Meßstellen im freien Strahl

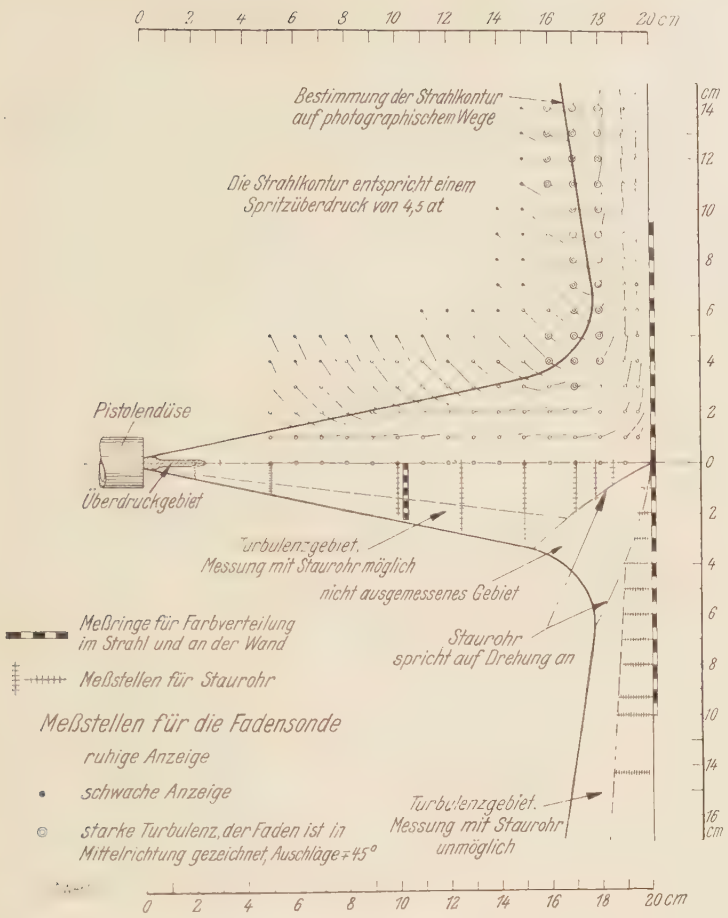


Abb. 33. Verteilung der Meßstellen im aufprallenden Strahl

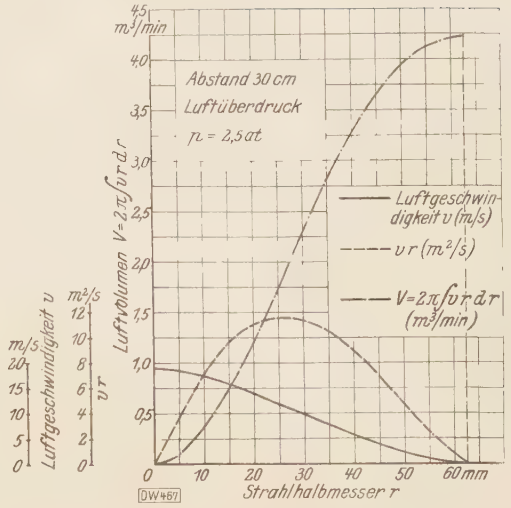


Abb. 35. Geschwindigkeits- und Luftmengenverteilung über dem Strahlhalbmesser

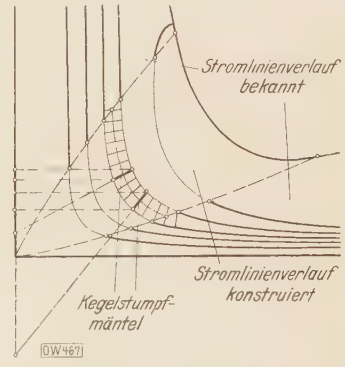


Abb. 36 Konstruktion der gekrümmten Stromlinien

element von der Höhe dh und dem Halbmesser ϱ mit der Geschwindigkeit v strömt, die Gleichungen

$$dV = 2\,\pi\,\varrho\,v\,dh \quad \ldots\ldots\ldots (26),$$

$$V = 2\,\pi\,\varrho \int_{h=0}^{h=h} v\,dh \quad \ldots\ldots\ldots (27);$$

die Volumenkurve ergibt sich also als einfache Integralkurve der entsprechenden Geschwindigkeitsfunktion. Die Verbindung der Punkte gleichen durchtretenden Volumens auf den einzelnen Meßquerschnitten ergibt den Stromlinienverlauf; ebenso werden die Linien gleicher Geschwindigkeit und Strömungsrichtung durch Verbinden entsprechender Punkte auf den Meßquerschnitten oder Stromlinien erhalten. Die Stromlinien im Turbulenzgebiet der abfließenden Luft, für das keine Geschwindigkeitsmessungen vorlagen, wurden aus den bis zur Strahlgrenze extrapolierten Geschwindigkeitskurven errechnet.

Bei der Konstruktion der gekrümmten Stromlinien an der Umlenkstelle, Abb. 36, wurde derart vorgegangen, daß diese innerhalb des unausgemessenen Gebietes zunächst nach Annahme ergänzt wurden. Dann erfolgte stückweise die Ermittlung der Geschwindigkeiten, die nur zu Beginn und Ende des angenommenen Stückes aus den Messungen bekannt sind, nach der Kontinuitätsgleichung, wobei die Durchschnittsquerschnitte infolge der Rotationssymmetrie als Kegelstumpfmäntel eingesetzt wurden. Nach Verbinden entsprechender Punkte durch Linien gleicher Geschwindigkeit und gleicher Neigung wurden diese den aus den bekannten Gebieten her extrapolierten Kurven angeglichen und der angenommene Stromlinienverlauf entsprechend berichtigt.

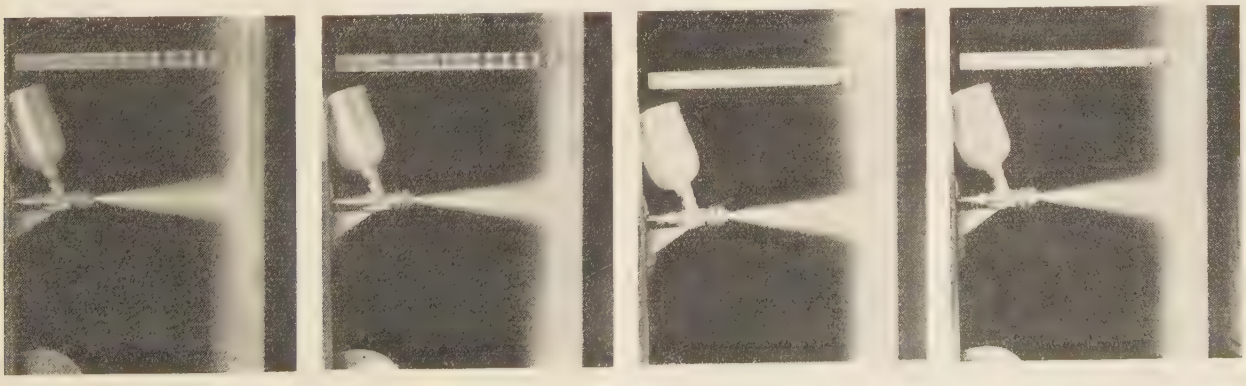


Abb. 34. Bestimmung der Strahlkonturen auf photographischem Wege

Die Messungen wurden für die überkritischen Überdrücke von 1,5 bis 4,5 at in Abständen von 1 at zeichnerisch und rechnerisch ausgewertet, wobei sich ergab, daß die bei $p = 2{,}5$ at Luftüberdruck erhaltenen Werte bezüglich der Mengenverteilung und Stromlinienform ungefähre Mittelwerte für den Druckbereich von 1,5 bis 4,5 at darstellen. Demzufolge sind in Tafel II bis IV, Abb. 37 bis 54, nur die Meßergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen sowie der Mengenverteilungen für alle Überdrücke angegeben. Die Stromlinien als Linien gleichen Volumens, die Linien gleicher Geschwindigkeit sowie die Linien gleicher Neigung gegen die Wand entsprechen den Messungen bei einem Luftüberdruck von 2,5 at.

Versieht man die Stromlinien, die Isotachen und Isoklinen mit Kennzahlen, die sich auf den Anfangszustand beziehen, so ist man imstande, durch ihre Multiplikation mit den Bezugsgrößen den Strömungszustand hinsichtlich Geschwindigkeit, Menge und Richtung in jedem Punkt des Feldes zu bestimmen.

Es gilt

für die Geschwindigkeit v_n in einem beliebigen Punkte des Frei- und Prallstrahls:

$$v_n = c_1 \, v_{max} \quad \ldots\ldots (28)$$

mit v_{max} als Höchstgeschwindigkeit im Luftstrahl bei dem entsprechenden Überdruck [m/s] und c_1 als Kennzahl der Linien gleicher Geschwindigkeit;

für die Geschwindigkeit v_a in einem beliebigen Punkte auf der Strahlachse:

$$v_a = c_2 \, v_{max} \quad \ldots\ldots (29);$$

die Kennzahl c_2 ist als das Verhältnis $v_a : v_{max}$ in Tafel II in dem Geschwindigkeits-Mengen-Diagramm, Abb. 37, als Sondermaßstab, bezogen auf 2,5 at mittleren Überdruck, dargestellt.

v_w (s. Abb. 48, Taf. III) bedeutet die Luftgeschwindigkeit an der Wand im abfließenden Strahl [m/s].

Für die Gesamtmenge V_g im Freistrahl sowie dem kegelförmigen und abfließenden Teil des Prallstrahls gilt:

$$V_g = c_3 \, V \quad \ldots\ldots (30);$$

V_n Luftvolumen, das durch einen beliebigen Teil des Querschnitts strömt [m³/min]; V_g durch den betreffenden Querschnitt strömendes Gesamtvolumen [m³/min]; V Luftverbrauch der Pistole [m³/min]. Die Kennzahl c_3 ist als das Verhältnis $V_g : V$ in Tafel II für Freistrahl, für beide Teile des Prallstrahls in Tafel III in den betreffenden Geschwindigkeits-Mengen-Diagrammen als Sondermaßstab dargestellt [Bezugsüberdruck 2,5 at].

Die gemessenen Werte und ihre Abweichungen gegenüber den nach dem mittleren Strömungsfeld errechneten sind in Zahlentafel 4 dargestellt.

Zahlentafel 4

Abweichung der gemessenen Werte von den nach dem mittleren Strömungsfeld berechneten

Luftüberdruck	Luftvolumen		Luftgeschwindigkeit	
p at	$\frac{V_{500}}{V}$ *)	$\frac{V_{125}}{V}$ **)	$\frac{v_{st}}{v_{max}}$ ***)	$\frac{v_{125}}{v_{max}}$ **)
0,5	70,0	66,0	0,051	0,019
1,5	53,9	43,2	0,070	0,022
2,5	47,2	36,9	0,075	0,023
3,5	46,1	35,4	0,079	0,025
4,5	44,6	33,1	0,088	0,028

*) V_{500} Luftvolumen in 500 mm Abstand von der Düse im Freistrahl [m³/min]

**) V_{125} v_{125} Luftvolumen und Luftgeschwindigkeit an der Wand im [illegible] Teil des Prallstrahls in 125 mm Abstand von der Strahl[illegible]

***) v_{st} Luftgeschwindigkeit im Staupunkt des Prallstrahls [m/s].

Wie aus Zahlentafel 4 hervorgeht, liegen die Werte mit Abweichung von rd. $\pm 12\,\%$ in der Mitte zwischen 1,5 und 4,5 at.

Die großen Abweichungen gegenüber dem Luftüberdruck von 0,5 at erklären sich aus dem Umstand, daß der Luftüberdruck zwischen 0,5 und 4,5 at aus dem unterkritischen in den überkritischen Bereich übergeht und daß in diesem Bereich keine Proportionalität zwischen dem Druck einerseits und den Geschwindigkeiten und austretenden Luftmengen anderseits besteht. Der Ermittlung der Tropfenbahnen, Aufschlaggeschwindigkeiten und Nebelmengen wird durchgängig das mittlere Strömungsfeld zugrunde gelegt.

c) Ermittlung der Tropfenbahnen und Aufschlaggeschwindigkeiten

Bewegen sich im freien Strahl die Farbteilchen innerhalb der Luftstromlinien, so beginnen sich Tropfen- und Luftbahnen an der Umlenkstelle, d. h. auf der mit dem

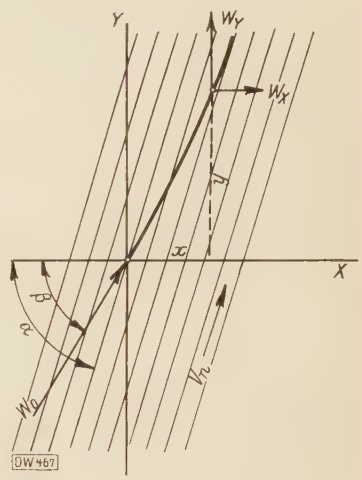


Abb. 55. Schema des Ausscheidungsvorgangs

Staurohr ermittelten Linie, zu trennen. Von diesem Punkt an erfolgt die Ermittlung der Tropfenbahnen und Geschwindigkeiten nach den von *Sell* [27] ermittelten Formeln mit den Bezeichnungen von Abb. 55.

Die Ableitung geht wiederum vom Impulssatz, Gl. (22)

$$-m \, dv_n = W \, dt$$

sowie dem *Stokes*schen Widerstandsgesetz $W = 6 \pi r \eta v_n$, das hier infolge der Größenordnung der Reynoldsschen Zahl ($R \approx 30$) anwendbar ist, mit den Bezeichnungen von S. 10 aus.

Bei beliebiger Bewegung eines Tropfens in einem für den Zeitabschnitt t als äquidistant und gerade gerichtet angenommenen Strömungsfeld erhält man aus diesen Gleichungen unter Einsetzung der jeweiligen Absolut- und Relativgeschwindigkeiten nach einmaliger Integration die Geschwindigkeitskomponenten und nach zweimaliger die Ortskomponenten.

Die Formeln lauten:

$$w_x = v_n \cos\alpha \left(1 - e^{-\frac{6\pi r\eta}{m} t}\right) + w_0 \cos\beta \, e^{-\frac{6\pi r\eta}{m} t} \quad (31);$$

$$w_y = v_n \sin\alpha \left(1 - e^{-\frac{6\pi r\eta}{m} t}\right) + w_0 \sin\beta \, e^{-\frac{6\pi r\eta}{m} t} \quad (31a);$$

$$x = \frac{m}{6\pi r\eta} v_n \cos\alpha \left[\frac{6\pi r\eta}{m} t - \left(1 - e^{-\frac{6\pi r\eta}{m} t}\right)\right]$$

$$\frac{m}{6\pi r\eta} w_0 \cos\beta \left(1 - e^{-\frac{6\pi r\eta}{m} t}\right) \ldots\ldots (32);$$

$$y = \frac{m}{6\pi r\eta} v_n \sin\alpha \left[\frac{6\pi r\eta}{m} t - \left(1 - e^{-\frac{6\pi r\eta}{m} t}\right)\right] + \frac{m}{6\pi r\eta} w_0 \sin\beta \left(1 - e^{-\frac{6\pi r\eta}{m} t}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (33);$$

$$w_R = \sqrt{w_x^2 + w_y^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (34).$$

Hierin bedeutet

w_0	die Anfangstropfengeschwindigkeit [m/s],	v_n	die Luftgeschwindigkeit [m/s],
w_x, w_y	die Geschwindigkeitskomponenten des Tropfens [m/s],	α	die Neigung des Strömungsfeldes [°],
w_R	die resultierende Tropfenendgeschwindigkeit [m/s],	β	den Neigungswinkel der Bewegungsrichtung [°],
x, y	die Ortskoordinaten des Tropfens [m],	t	die Zeit [s],
		m	die Tropfenmasse [kg s²/m],
		r	den Tropfenhalbmesser [m],
		η	die Luftzähigkeit [kg s/m²].

Die Tropfengeschwindigkeit an der Trennstelle wird unter Vernachlässigung eines kleinen Schlupfes der Luftgeschwindigkeit gleichgesetzt; die Tropfenbahnen wurden punktweise für Zeitintervalle von 0,0001 bis 0,0004 s berechnet. Die Grenzbahnen, die sich durch Probieren ergeben, wurden für Überdrücke von 0,6 und 5,6 at sowie für pigmentierte Farben und Klarlacke getrennt ermittelt. Hierbei wurden je Öl- und Nitrolack sowie Ölspachtel und Ölgrundfarbe durch einfaches Ausmitteln ihrer Tropfendurchmesser und spezifischen Gewichte zusammengefaßt.

d) Ermittlung der Tropfenverteilung im Strahl

Um die in den einzelnen Strahlquerschnitten geförderten Farbmengen, die in der Mitte naturgemäß größer als in der äußeren Zone sind, ermitteln und vergleichen zu können, muß man in gleichen Zeitspannen die jeweiligen Farbmengen herausfangen. Dies geschah mit der Fang-

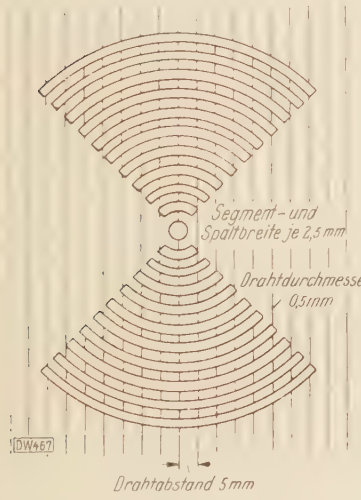
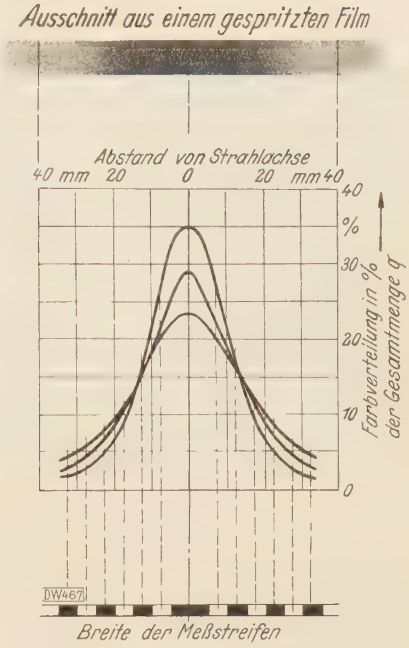


Abb. 56. Fangvorrichtung für Tropfen im Strahl

vorrichtung, Abb. 56, die aus einem mit dünnem Draht bespannten Rahmen bestand, in dessen Mitte die eigentlichen Fangflächen für die Farbe befestigt wurden. Diese hatten die Form von Viertelkreissegmenten von 2,5 mm Breite, die einander gegenüber angeordnet waren. Diese Gesamtanordnung ergab sich nach längeren Vorversuchen als diejenige, bei der die Strömung am wenigsten gestört und doch die Tropfen am wirksamsten herausgefangen wurden.

Als Segmentstoff wurde Planfilm verwandt, der mit der glatten Seite mittels Plastilin an den gespannten Drähten festgekittet wurde, die Schichtseite war beim Spritzen der Pistole zugekehrt. Die Schicht verhinderte dadurch, daß sie teilweise aufquoll, das seitliche Ablaufen der Farbe. Zum Versuch wurde die Vorrichtung genau zentriert unter der in einem einfachen Ständer befestigten Spritzpistole angebracht und einige Sekunden angespritzt.

Abb. 57
Farbverteilung an der Aufschlagstelle



Für den Fall aber, daß der Spritzdruck zu hoch und die geförderte Farbmenge zu groß war, was zu einem seitlichen Ablaufen der Farbe von den Segmenten führte, wurde die Fangvorrichtung unter der Blende angebracht und nur während der kurzen, durch den Verschluß freigegebenen Zeit angespritzt.

Als Spritzflüssigkeit wurde Ölgrundfarbe benutzt, zum Auswägen der Proben diente eine chemische Waage mit einer Genauigkeit $\pm$ 0,0001 g. Für jeden Spritzdruck und für jeden in Abb. 32 und 33 festgelegten Querschnitt wurden drei Messungen ausgeführt; auf Versuche mit verschiedenen Farbsorten wurde, obwohl sich wegen der Unterschiede der Tropfendurchmesser und Gewichte unter Umständen andere Verteilungen ergeben könnten, wegen der außerordentlich zeitraubenden Wägungen verzichtet.

Die durch einen bestimmten Teilquerschnitt geförderte Farbmenge q in % des durch den Gesamtquerschnitt strömenden Gewichts ergibt sich dann, wenn Q_1, Q_2, Q_n die auf den Segmenten gleichzeitig aufgefangenen Farbmengen darstellen, zu

$$\left.\begin{aligned} q_1 &= \frac{Q_1}{\Sigma Q} 100 \\ q_2 &= \frac{Q_2}{\Sigma Q} 100 \\ q_n &= \frac{Q_n}{\Sigma Q} 100 \end{aligned}\right| \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (35).$$

Die so erhaltenen Werte sind in Tafel II, Abb. 42, in Abhängigkeit vom Strahlhalbmesser und Abstand von der Düse aufgetragen, wobei die den Luftüberdrücken $p = 1{,}5$ und 3,5 at entsprechenden Kurven der Deutlichkeit halber nicht eingetragen sind. Sie fügen sich ihren Drücken entsprechend zwischen die anderen ein. Auch für diesen Fall lassen sich entsprechend den Linien gleicher Geschwindigkeit, Abb. 40, und gleicher Mengen, Abb. 41, Linien gleicher Farbverteilung ziehen, Abb. 42, die, wenn die Grenzbahnen für die betreffende Farbe bekannt sind, ohne weiteres die Größe der entstehenden Nebelmenge errechnen lassen.

e) Ermittlung der Farbverteilung im fertigen Film

Wie schon der bloße Augenschein ergibt, ist die Farbverteilung im Film ungleichmäßig in dem Sinne, daß die Stärke von der Mitte zu den Rändern hin erheblich abnimmt, Abb. 57. Sie wird zum Zweck der Kontrolle der Tropfenbahnen (Abschnitt 5 c) und der Versuchsergeb-

nisse des Abschnitts 5 d in ähnlicher Weise untersucht wie die Tropfenverteilung.

An Stelle der Farbsegmente tritt hier jedoch ein auf eine Unterlage gespanntes weißes Papier, das nach dem Anspritzen in vorher markierte Einzelabschnitte zerschnitten und dann ausgewogen wird. Um Störungen durch Aufnahme der Luftfeuchtigkeit und damit Verfälschung der Wägungen zu vermeiden, wurde eine stark geleimte, im Trockenschrank bei 80°C von den letzten Resten ihrer Feuchtigkeit befreite Papiersorte benutzt.

Die Wägungen und Auswertungen entsprechen genau denen des Abschnitts 5 d, vgl. Abb. 57.

F. Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Wie aus Abb. 20, Tafel I, hervorgeht, betragen die Tropfendurchmesser der zerstäubten Farben 0,006 bis 0,022 mm. Es ergibt sich, daß bei denselben Drücken die Zerstäubung der Lacke etwa doppelt so stark wie bei den pigmentierten Farben ist. Außerdem zeigt sich, daß die pigmentierten Farben hinsichtlich ihrer Zerstäubungsfeinheit stärker auf Druckerhöhung oder -erniedrigung ansprechen als die Lacke, wobei es nicht ausgeschlossen ist, daß dieses Verhalten infolge der labileren Bindung zwischen Bindemittel und Pigment bei Ölspachtel und Ölgrundfarbe in Zusammenhang mit den weiter unten beschriebenen Entmischungserscheinungen zu bringen ist.

Bezüglich der Gleichmäßigkeit der Tropfenbildung zeigt sich das erwartete Ergebnis, daß sie um so größer wird, je höher der Spritzdruck eingestellt ist. Eine ungleichmäßige Tropfenverteilung im Strahl in dem Sinne, daß sich etwa innen die großen und außen die kleinen befänden oder umgekehrt, wurde nicht beobachtet. Es sei besonders darauf hingewiesen, daß kleine Tropfendurchmesser, wie sie bei hohen Spritzdrücken entstehen, zwar für die Gleichmäßigkeit der Farbfilmbildung zweifellos günstig sind, daß aber auf der anderen Seite neben der weiter unten erwähnten mengenmäßigen Steigerung der Nebel- und Staubbildung die dadurch verursachte Belästigung um so größer wird, je kleiner die in der Raumluft schwebenden Tropfen oder Staubkörnchen sind. Hierbei ist für die Bewertung der Schädlichkeit eines Staubes oder Nebels neben der freien Oberfläche, von deren Größe die Gefahr gesundheitlicher Schädigungen und außerdem die Möglichkeit von Selbstzündungen weitgehend abhängig ist, die durch Gewicht und Größe bestimmte Sedimentierungsgeschwindigkeit entscheidend, d. h. also durchgängig Größen, die sich bei Drucksteigerung in ungünstigem Sinn ändern.

Die Größe der in den Strahl hineingesaugten Luftmenge erreicht bei Prallstrahl in einem Wandabstand von 20 cm im Mittel rd. das 35 fache, im Freistrahl in einem Abstand von der Düse von 50 cm im Mittel rd. das 50 fache des ursprünglich austretenden Luftvolumens. Das läßt erkennen, daß die in der Praxis und der Patentliteratur verbreitete Meinung, der Nebel entstünde durch Wirbelung oder Abspaltung von Farbluftgemisch am Umfang des kegelförmigen Teiles des Strahles, wenig Wahrscheinlichkeit für sich hat. Demzufolge sind alle Schutzmaßnahmen gegen die Nebelbildung, die darauf hinauslaufen, den Strahl mittels eines durch eine zweite Luftdüse austretenden Luftmantels einzuhüllen, unwirksam und vielmehr infolge der Vermehrung des Strahlvolumens schädlich.

Sowohl die Strahlformen als auch der Strömungsverlauf im Innern ändern sich trotz der großen Druck- und Geschwindigkeitsunterschiede nur wenig. Auch hier zeigt sich, namentlich in den eigentlichen Stromlinienbildern, Abb. 41 auf Tafel II und Abb. 43 auf Tafel III, in dem Verhältnis von Kernstrahl zu Gesamtstrahl die außerordentliche Größe der hineingepumpten Luftmenge.

Die Energieumsetzung im Strahl geht in der Weise vor sich, daß sich die Geschwindigkeit auf Kosten der Volumenvergrößerung verringert. Die Geschwindigkeits- und Mengenverteilungen weisen eine weitgehende Ähnlichkeit mit den von *Zimm* [8] und *Trüpel* [9] beobachteten Erscheinungen auf und lassen den Schluß als naheliegend erscheinen, daß infolge der großen, in den Strahl hineingesaugten Luftmengen sowohl die Form der Düse als auch die Erhöhung der Geschwindigkeiten keine grundsätzlich anderen Vorgänge veranlaßt; eine Ausnahme bildet die schon erwähnte Unproportionalität der Geschwindigkeits- und Mengenverhältnisse beim Übergang auf überkritische Geschwindigkeiten.

Die auf Tafel IV eingezeichneten, auf Spritzüberdruck p_s bezogenen Grenzbahnen für die beiden Farbgruppen, Abb. 51 und 52, lassen erkennen, um wieviel größer infolge der geringeren Tropfengrößen und Tropfengewichte die entstehenden Nebelmengen und die damit zwangläufig auftretenden Verluste und Belästigungen für Lacke als für die schweren, grobzerstäubenden pigmentierten Farben sind. Der Unterschied beträgt bei gleichen Spritzdrücken beinahe 100 %, Abb. 53, Tafel IV, weil die kleineren, spezifisch leichteren Lacktröpfchen nicht imstande sind, die abfließende Luft über einen längeren Weg hin zu durchschlagen und die Wand zu erreichen. Auch diese Mehrentwicklung an Nebel läßt die praktische Anschauung, die die Belästigung und Gefährdung durch Lacknebel als besonders unangenehm empfindet, als berechtigt erkennen.

Für die Vermehrung der Nebelmenge bei Steigerung des Spritzüberdruckes von 0,6 auf 5,6 at ergibt sich, daß sie einerseits wegen der großen prozentualen Steigerung und ferner wegen der ungefähr verdoppelten Farbleistung der Pistole auf das Acht- bis Zwölffache der Menge bei kleinem Drucke steigt. Die Zeit, die die Tropfen zum Zurücklegen des Weges von der Düse bis zur Wand brauchen, beträgt bei einem Spritzdruck von 0,6 at ungefähr $^1/_{100}$ s, bei 5,6 at ungefähr $^1/_{200}$ s, was noch dazu bei dem kleinen Temperaturgefälle zwischen Luft und Farbe eine Verdampfung verhältnismäßig unwahrscheinlich macht. Für diese in der Praxis aufgestellte Behauptung spricht jedoch die außerordentliche Oberflächenvergrößerung, die bei Öllack bis auf 1,5 m^2/cm^3 Farbe anwächst, so daß also eine endgültige Beantwortung dieser Frage ohne weitere Untersuchungen noch nicht möglich erscheint.

Die Geschwindigkeiten, mit denen die Tropfen auf die Wand aufschlagen, Abb. 54, Tafel IV, liegen für einen Pistolenabstand von 20 cm beim ungefähr 0,075 fachen der auftretenden Höchstluftgeschwindigkeit, was innerhalb eines Druckbereichs von 0,6 bis 5,6 at Geschwindigkeiten von 5 bis 33 m/s entspricht. Naturgemäß sind diese Geschwindigkeiten für die im Inneren des Strahles auftreffenden Tropfen höher als für die, deren Lage sich den Grenzbahnen nähert.

Auch der sich bildende Farbfilm zeigt die im Strahl auftretende, außerordentlich ungleichmäßige Farbverteilung über den Querschnitt (Abb. 42, Tafel II und Abb. 57), wenn diese sich auch infolge der seitlichen Ablenkung der Farbbahnen etwas mehr ausgleicht.

Die Frage nach dem Verhalten der Tropfen beim Aufschlagen hinsichtlich ihrer Formbeständigkeit kann dahingehend beantwortet werden, daß ein Zerfall der Tropfen infolge ihrer Steifigkeit, die in dem kleinen Durchmesser begründet liegt, nicht in Frage kommt. Dieses Ergebnis war nicht von vornherein zu erwarten, da die Untersuchungen von *Tsutsui* [32], Abb. 58, die für wesentlich kleinere

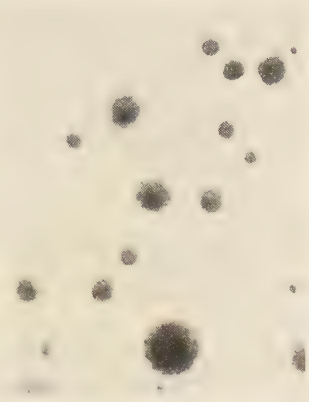


Abb. 59

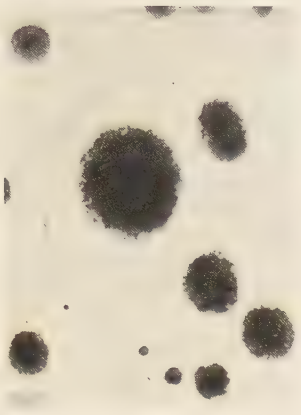


Abb. 60

Einzeltropfen

Spritzüberdruck: 4,5 at 0,5 at
Beleuchtung: Auffallendes Licht

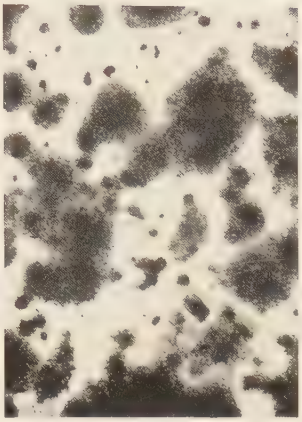


Abb. 61

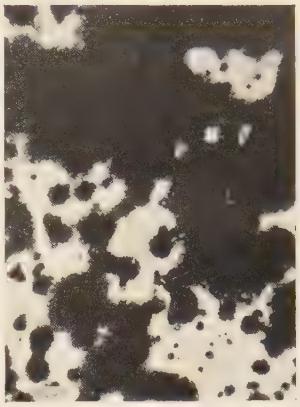


Abb. 62

Entstehender Farbfilm

4,5 at 4,5 at
Durchfallendes Licht Auffallendes Licht

Tafel V

(Abb. 59 bis 62)

Tropfen- und Filmbildung von Ölspachtel

Zu Abb. 60 und 61
Schema des Entmischungsvorgangs

Erklärung zu Tafel V bis VIII

Vergrößerung: Original 200 fach Wiedergabe $^1/_2$
Untergrund: Glasplatte
Abstand von Pistole: 20 cm
Temperatur 18° C

Tafel VI

(Abb. 63 bis 65)

Tropfen- und Filmbildung von Ölgrundfarbe

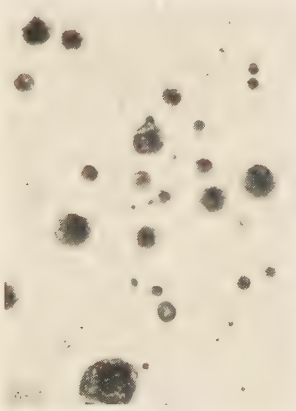


Abb. 63

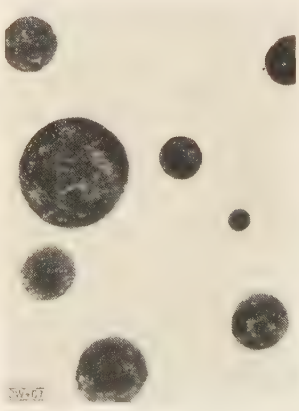


Abb. 64

Einzeltropfen

Spritzdruck: 4,5 at 0,5 at
Beleuchtung: Auffallendes Licht

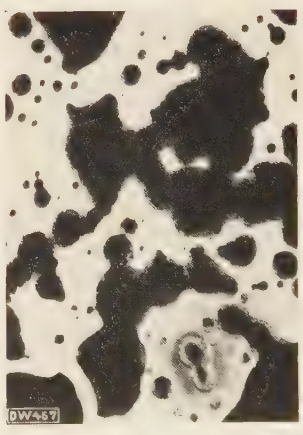


Abb. 65

Entstehender Farbfilm

4,5 at
Durchfallendes Licht

Abb. 66
Spritzüberdruck: 4,5 at
Beleuchtung:
Ölschleiflack farblos

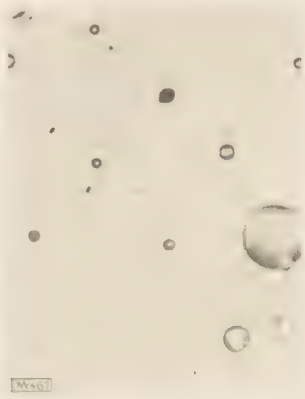
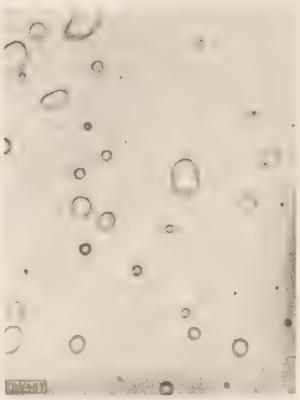


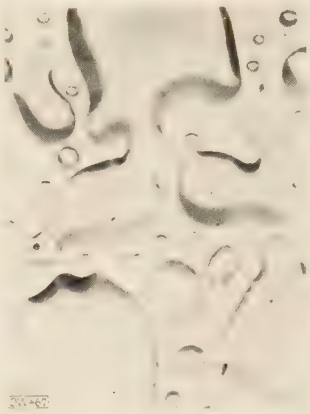
Abb. 67
0,5 at



Einzeltropfen
Abb. 68
4,5 at
Auffallendes Licht

Nitroüberzuglack farblos
Abb. 69
0,5 at

Tafel VII
(Abb. 66 bis 70)
Tropfen- und Filmbildung von Klarlacken



Entstehender Farbfilm
Ölschleiflack farblos
Spritzüberdruck 4,5 at
Auffallendes Licht

Abb. 70

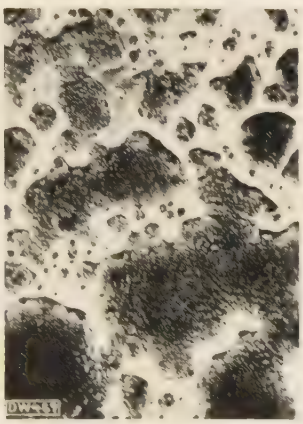


Abb. 71

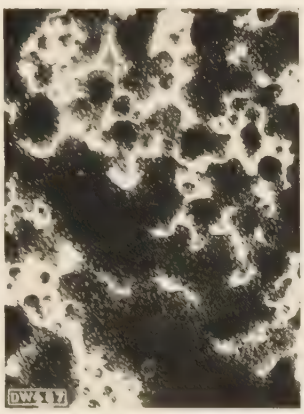


Abb. 73

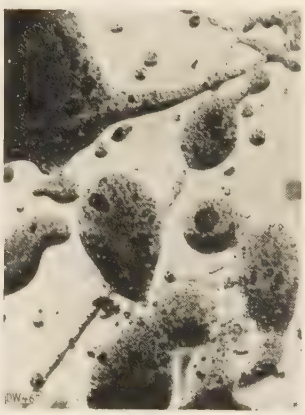


Abb. 75

Durchfallendes Licht

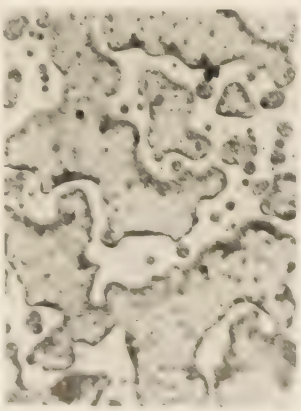


Abb. 72
[illegible] innenemaille

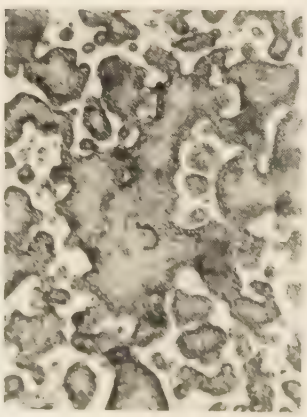


Abb. 74
Nitrolack, weiß

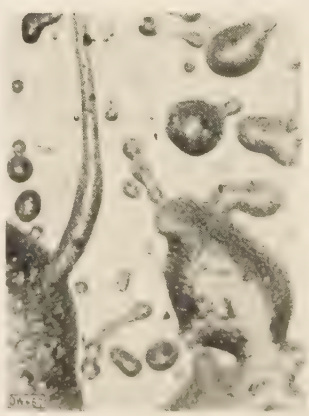


Abb. 76
Nitrolack, grün

Auffallendes Licht

Tafel VIII
(Abb. 71 bis 76)
Filmbildung von pigmentierten Lacken
Spritzüberdruck: 4,5 atü

Abb. 58. Zerfall großer Tropfen beim Aufprall auf die Wand

Flüssigkeit: Alkohol 25 %, Wasser 75 %
Aufschlagfläche: Papier
Tropfendurchmesser: 5,2 mm
Aufschlaggeschwindigkeit: ungefähr 6 m/s

Flüssigkeit: Glyzerin 2,5 %
Wasser 97,5 %
Aufschlagfläche: Papier
Tropfendurchmesser: 7,2 mm
Aufschlaggeschwindigkeit: 6 m/s

Geschwindigkeiten (ungefähr 2 bis 6 m/s) mit allerdings erheblich größeren Tropfen (bis 7,2 mm Dmr.) unternommen wurden, ergaben, daß sowohl Protuberanzenbildung als auch ein Absplittern kleinerer Tröpfchen auftrat.

Es zeigte sich jedoch die Erscheinung, daß sich namentlich der untersuchte Ölspachtel, Abb. 59 bis 62, Tafel V, und auch die Ölfarbe, Abb. 63 bis 65, Tafel VI, derartig entmischten, daß das im Lösungsmittel suspendierte Pigment infolge seiner Massenwirkung die Flüssigkeit an den Rändern herausquetschte. Abb. 60 und 61, Tafel V, sowie das dazu gehörige Schema zeigen diese Erscheinung, die sowohl bei den Einzeltropfen als auch im fertigen Film zu bemerken ist, besonders deutlich. Sie kann nach Trocknen des Anstrichs unter Umständen dahin führen, daß sich zwischen einwandfreien, zusammenhängenden Teilen des Farbfilms Stellen finden können, die infolge Pigmentmangels eine poröse Struktur aufweisen und den Zutritt korrosionsfördernder Flüssigkeiten oder Gase nicht verhindern.

Es ist auffällig, daß diese Erscheinungen bei Kontrollversuchen mit pigmentierten Öl- und Nitrolacken, Abb. 71 bis 76, Tafel VIII, auch bei starker Verdünnung nicht zu erzwingen waren. Das liegt wahrscheinlich darin begründet, daß die Bindung zwischen Pigment und Lösungs- oder Bindemittel ungleich inniger ist. Ein endgültiges Urteil über diese Erscheinungen ist jedoch ohne weitere, sehr eingehende Untersuchungen bezüglich der Farbzusammensetzung sowie des Verhältnisses Pigment zu Lösungs- oder Bindemittel zu Verdünner nicht möglich.

Es ist außerdem wahrscheinlich, daß das Zusammenlaufen der Einzeltropfen zum geschlossenen Film durch das Heraustreten des dünnflüssigen Bindemittels erleichtert wird, wie überhaupt die Beobachtung zeigt, daß die Steifigkeit der Lacktropfen größer ist, s. Abb. 66 bis 70, Tafel VII. Mit der Tatsache der größeren Brecharbeit bei Lacktropfen ist zwanglos die praktische Erfahrung in Einklang zu bringen, daß zur Herstellung einwandfreier Lackierungen in der Regel höhere Spritzdrücke erforderlich sind als für das Aufbringen guter Ölfarbenanstriche.

Aus den von pigmentierten Lacken hergestellten Mikroaufnahmen, Tafel VIII, kann man die Homogenität der Tropfen gegenüber der Entmischung bei den anderen Farben ersehen, die Aufnahmen des grünen Nitrolacks lassen erkennen, daß die Farbe zum Spritzen zu zähe war. Die Zerstäubung ist nicht zum Abschluß gekommen und die einzelnen Tropfen ziehen lange, das Verlaufen der Farbe behindernde Fäden hinter sich her. Möglicherweise ergibt sich aus einer derartigen, mit einfachen auch betriebsmäßigen Mitteln durchführbaren mikroskopischen Betrachtung der Aufschläge eine Prüfung der Spritzeignung hinsichtlich der Farbzähigkeit.

In der Zahlentafel 5 sind die Gesamtergebnisse zur Schaffung einer besseren Übersicht kurz zusammengestellt.

Zahlentafel 5

Zusammenfassung der Gesamtergebnisse

Spritzüberdruck	steigend von 0,5 auf 4,5	at	
Luftgeschwindigkeit an der Düsenmündung	steigend von 230 auf 450	m/s	
Luftverbrauch	steigend von 40 auf 220	l/min	
Farbförderung	steigend von 0,03 auf 0,38	l/min	je nach Farbsorte
Spritzleistung der Pistole	steigend		
Gleichmäßigkeit der Zerstäubung	steigend		
Tropfengröße	abnehmend von 0,021 auf 0,006	mm Dmr.	je nach Farbsorte
Strahlkontur und Strömungsverlauf im Strahlinnern	ungefähr gleichbleibend		
In den Strahl hereingerissene Luftmenge	steigend von 2,5 auf 7,0	m³/min	
Aufschlaggeschwindigkeit der Farbtropfen	steigend von 5 auf 30	m/s	je nach Farbsorte u. Aufschlagstelle
Gleichmäßigkeit der Tropfenverteilung im Strahl	abnehmend		
Gleichmäßigkeit des erzeugten Farbfilms	abnehmend		
Breite des erzeugten Farbfilms	ungefähr gleichbleibend		
Nebelmenge	steigend von 3 auf 22	% des Farbverbrauchs	je nach Farbsorte
Nebelbelästigung	zunehmend infolge Verkleinerung der Einzelteilchen und ihrer Sedimentierungsgeschwindigkeit sowie der Oberflächenvergrößerung		

Schrifttumverzeichnis

Endgeschwindigkeiten und Widerstandszahlen kleiner Kugeln und Tropfen in verschiedenen Medien

[1] *Lenard, P.*, Über Regen. Meteorol. Z. Bd. 21 (1904) S. 249.

[2] *Lenard, P.*, Schwingungen fallender Tröpfchen. Wied. Ann. Bd. 30 (1887) S. 209.

[3] *Liznar, J.*, Fallgeschwindigkeit der Regentropfen. Meteorol. Z. Bd. 31 (1914) S. 339.

[4] *Zeleny, J.*, u. *McKeehan*, Die Endgeschwindigkeit des Falles kleiner Kugeln in Luft. Physik. Z. Bd. 11 (1910) S. 78.

[5] *Schmidt, W.*, Eine unmittelbare Bestimmung der Fallgeschwindigkeit von Regentröpfchen. Meteorol. Z. Bd. 26 (1909) S. 183.

[6] *Allen, H. S.*, The motion of a sphere in a viscous fluid. Phil. Mag. Ser. 5 Vol. 50 S. 323.

[7] *Prandtl, L.,* Ergebnisse der Aerodynamischen Versuchsanstalt zu Göttingen. 2. Lfrng. (München und Berlin: R. Oldenbourg 1923) S. 28.

Strömungsvorgänge im freien Strahl

[8] *Zimm, W.,* Strömungsvorgänge im freien Strahl. Forsch.-Arb. Ing.-Wes. Heft 234 (Berlin: VDI-Verlag 1921).

[9] *Trüpel, Th.,* Einwirkung eines freien Strahls auf die umgebende Luft. Karlsruhe 1913, Dissertation. Z. ges. Turb.-Wes. Bd. 12 (1915) S. 52.

[10] *Tollmien, W.,* Berechnung turbulenter Ausbreitungsvorgänge. Z. f. angew. Math. u. Mech. Bd. 6 (1926) S. 468.

[11] *Reich, Fr.,* Umlenkung eines freien Flüssigkeitsstrahles an einer senkrecht zur Strömungsrichtung stehenden ebenen Platte. Forsch.-Arb. Ing.-Wes. Heft 290 (Berlin: VDI-Verlag 1926).

Strahlzerfall und Zerstäubung unter Flüssigkeitsüberdruck (Kompressorlose Einspritzung)

[12] *Romberg, F.,* Verbrennungsmotoren. Z. VDI Bd. 72 (1928) S. 1279.

[13] *Eichelberg, G.,* Über die Mittel zur kompressorlosen Brennstoffeinspritzung. Z. VDI Bd. 70 (1926) S. 1079.

[14] *Riehm, W.,* Untersuchung über den Einspritzvorgang an Dieselmaschinen. Z. VDI Bd. 68 (1924) S. 641.

[15] *Kuehn, R.,* Zerstäubung flüssiger Brennstoffe. Motorwagen Bd. 27 (1924) S. 325 u. f. — Motorwagen Bd. 28 (1925) S. 21 u. f.

[16] *Hänlein, A.,* Über den Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles. Forschung Bd. 2 (1931) S. 139.

[17] *Weber, C.,* Zum Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles. Z. f. angew. Math. u. Mech. Bd. 11 (1931) S. 136.

[18] *Oehler, Th.,* Der Wasserstrahl und seine Auflösung in Tropfen. Techn. Mech. u. Thermodyn. Bd. 1 (1930) S. 329.

[19] *Triebnigg, H.,* Der Einblase- und Einspritzvorgang bei Dieselmaschinen. (Wien: Julius Springer 1925.)

[20] *Saß, Fr.,* Kompressorlose Dieselmotoren. (Berlin: Julius Springer 1929) S. 49 u. f.

[21] *Saß, Fr.,* Neuere amerikanische und deutsche Untersuchungen über Druckeinspritzung bei Dieselmotoren. Forsch. a. d. Geb. d. Ing.-Wes. Bd. 2 (1931) S. 351.

Zerstäubung mit Hilfe von Luft

[22] *Sauter, J.,* Die Größenbestimmung der im Gemischnebel von Brennkraftmaschinen enthaltenen Brennstoffteilchen. Forsch.-Arb. Ing.-Wes. Heft 279 (Berlin: VDI-Verlag 1924).

[23] *Sauter, J.,* Untersuchung der von Spritzvergasern gelieferten Zerstäubung. Forsch.-Arb. Ing.-Wes. Heft 312 (Berlin: VDI-Verlag 1928).

[24] *Triebnigg, H.,* Der Einblase- und Einspritzvorgang bei Dieselmaschinen. (Wien: Julius Springer 1925.)

Eigenbewegung kleiner Körper in strömender Luft

[25] *Gasterstädt, J.,* Die experimentelle Untersuchung des pneumatischen Fördervorgangs. Forsch.-Arb. Ing.-Wes. Heft 265 (Berlin: VDI-Verlag 1924).

[26] *Albrecht, F.,* Theoretische Untersuchungen über die Ablagerung von Staub aus strömender Luft und ihre Anwendung auf die Theorie der Staubfilter. Physik. Z. 32. Jhrg. (1931) S. 48.

[27] *Sell, W.,* Staubausscheidung an einfachen Körpern und in Luftfiltern. Forschungsheft 347 (Berlin: VDI-Verlag 1931).

Überkritische Geschwindigkeiten bei Ausströmung aus Düsen

[28] *Lewicki, E.,* Die Anwendung hoher Überhitzung beim Betrieb von Dampfturbinen. Z. VDI Bd. 47 (1903) S. 525 u. f.

[29] *Zerkowitz, G.,* Über die freie Expansion von Gasen und Dämpfen. Dingl. Polyt. Journ. Bd. 329 (1914) S. 639.

[30] *Schüle, W.,* Technische Thermodynamik. (Berlin: Julius Springer 1930) Bd. 1, Tl. 1, S. 293 u. f.

Physikalische Grundlagen, Meßmethoden

[31] *Bakker,* Kapillarität. Hdbch. d. Exp.-Phys. Bd. 6 (Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft 1928).

[32] *Tsutsui, T.,* Rupture Phenomena of Liquid Drops. Scientific Papers of the Institute of Physical and Chemical Research, Vol. 16 (Tokyo 1931) S. 109.

[33] Regeln für Leistungsversuche an Ventilatoren und Kompressoren. (Berlin: VDI-Verlag 1926.)

Staubtechnik

[34] *Meldau, R.,* Der Industriestaub. (Berlin: VDI-Verlag 1926.)

Farb-Spritztechnik

[35] *Nettmann, P.,* Vergleichende Versuche mit Farbspritzpistolen. (Berlin: VDI-Verlag 1929.)

[36] *Nettmann, P.,* u. *Faber, H.,* Untersuchung über die Leistung und den Wirkungsgrad von Sandstrahldüsen. (Berlin: VDI-Verlag 1930.)

Oberflächenbeschaffenheit

[37] *Kiesewetter, W.,* Untersuchung verschiedener Methoden zur Bestimmung der Unebenheiten von Metallflächen. Dresden 1931. Dissertation.

Tafel II

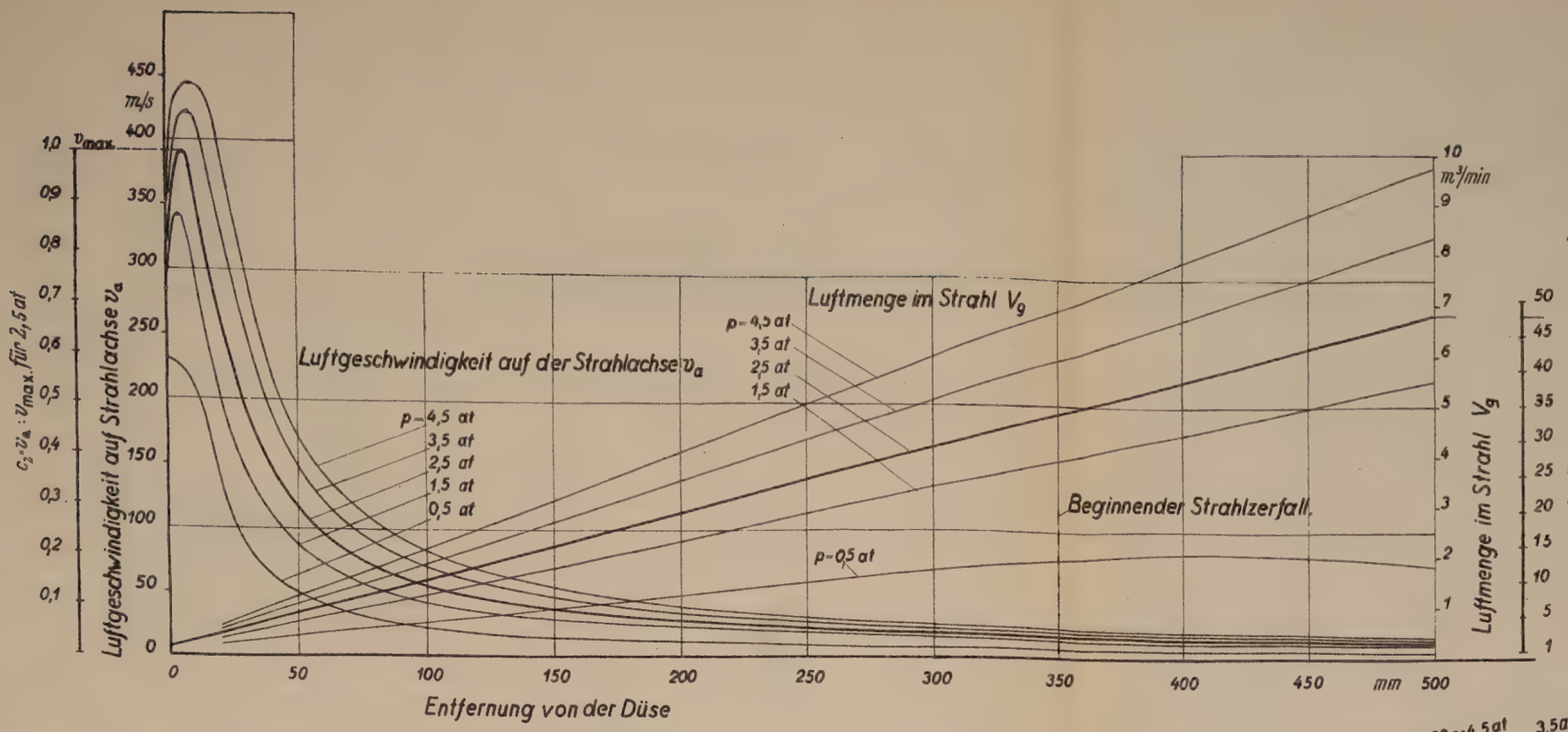


Abb. 37

Luftgeschwindigkeit auf Strahlachse.

Luftmengen im Strahl.

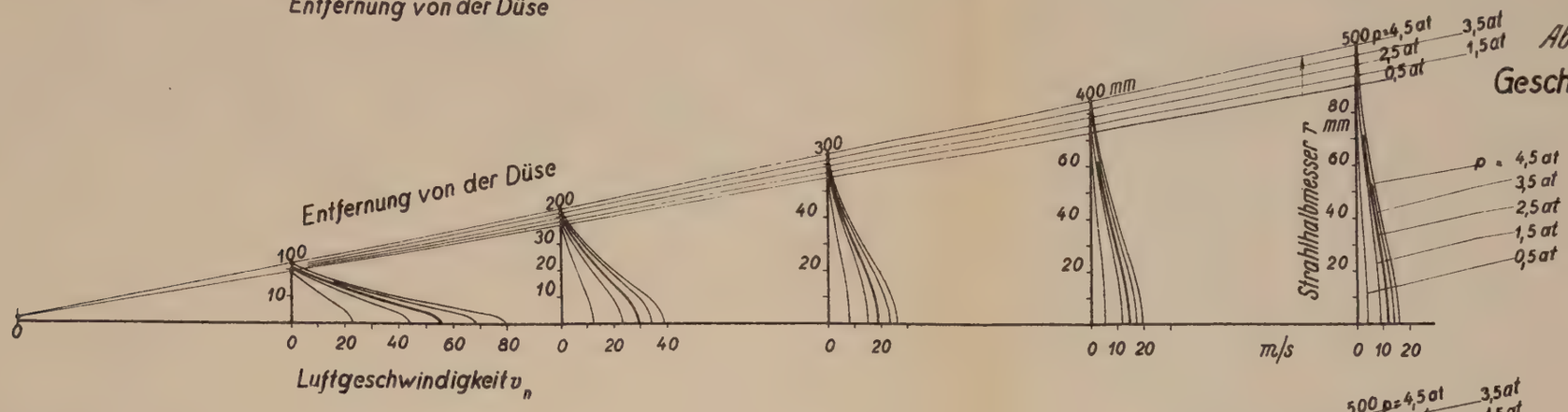


Abb. 38

Geschwindigkeitsverteilung im Strahl.

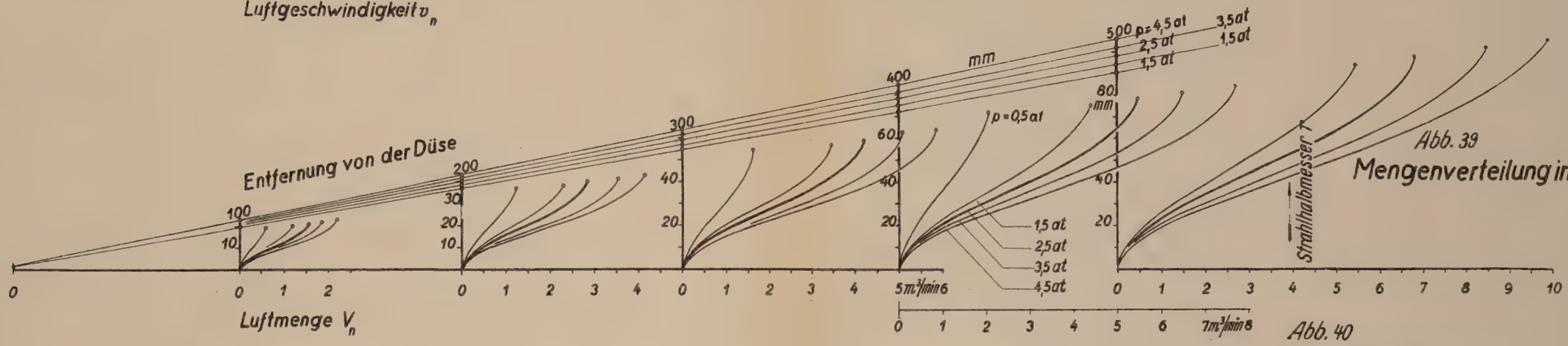
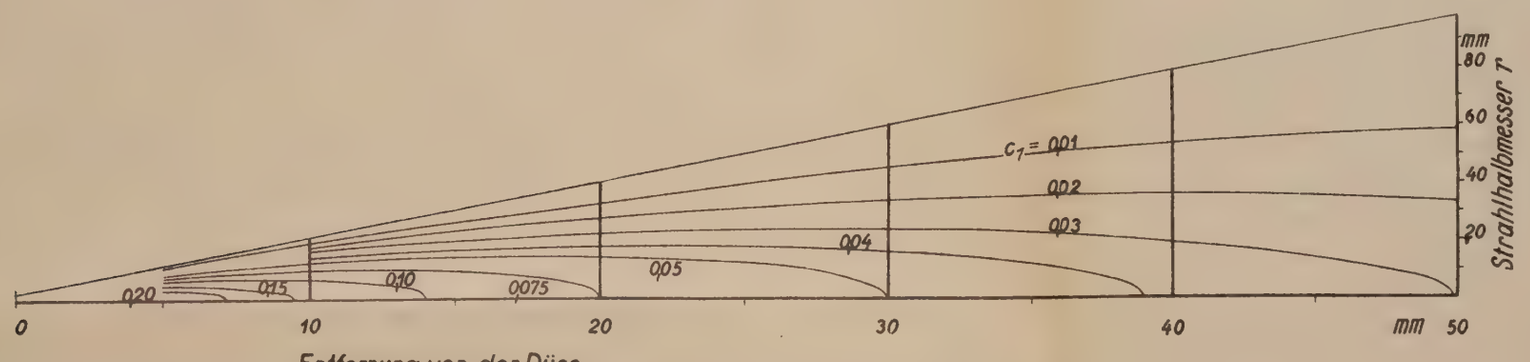


Abb. 39

Mengenverteilung im Strahl.

Abb. 40

Linien gleicher Geschwindigkeit.



Luftüberdruck $p_ü$ = 2,5 at

$v_n = c_1 v_{max}$

v_n Örtliche Momentangeschwindigkeit m/s

v_{max} Höchstgeschwindigkeit im Luftstrahl m/s

c_1 Umrechnungsfaktor (im Diagramm eingetragen)

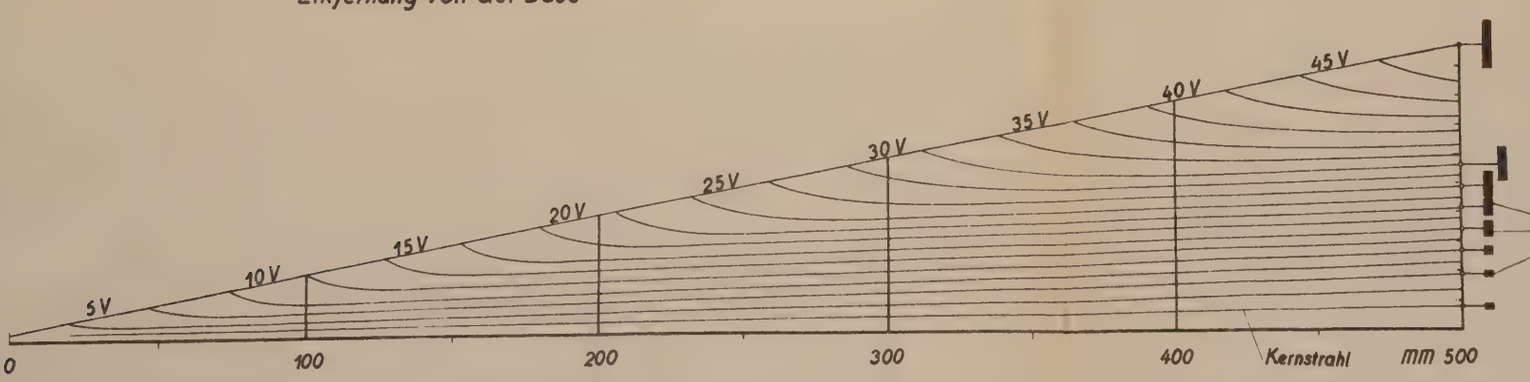


Abb. 41

Stromlinien.

Luftüberdruck $p_ü$ = 2,5 at

Verschiebung der Stromlinien bei Drucksteigerung von 0,5 auf 4,5 at

Die Innenlage entspricht einem Druck von 0,5 at

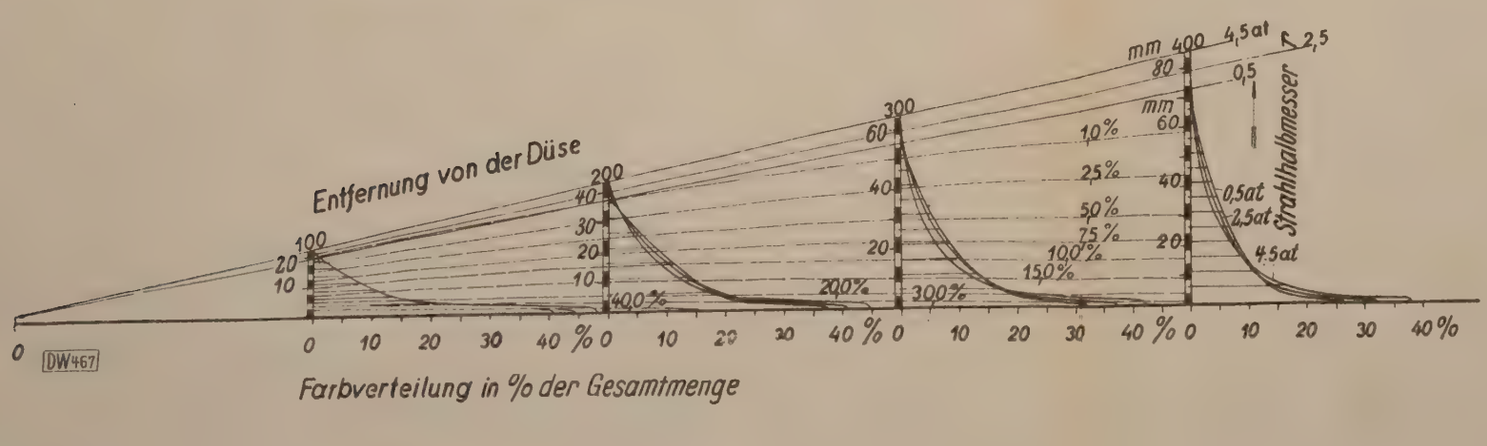


Abb. 42

Farbverteilung im Strahl.

Linien gleicher Farbdichte.

——— Farbenverteilung über dem Querschnitt

– – – – Linien gleicher Farbenverteilung

Tafel III

Stromlinien

Luftüberdruck $p = 2{,}5$ at
Verschiebung der Stromlinien
bei Drucksteigerung von 0,5 bis 4,5 at.
Die Innenlage entspricht einem Überdruck
von 0,5 at

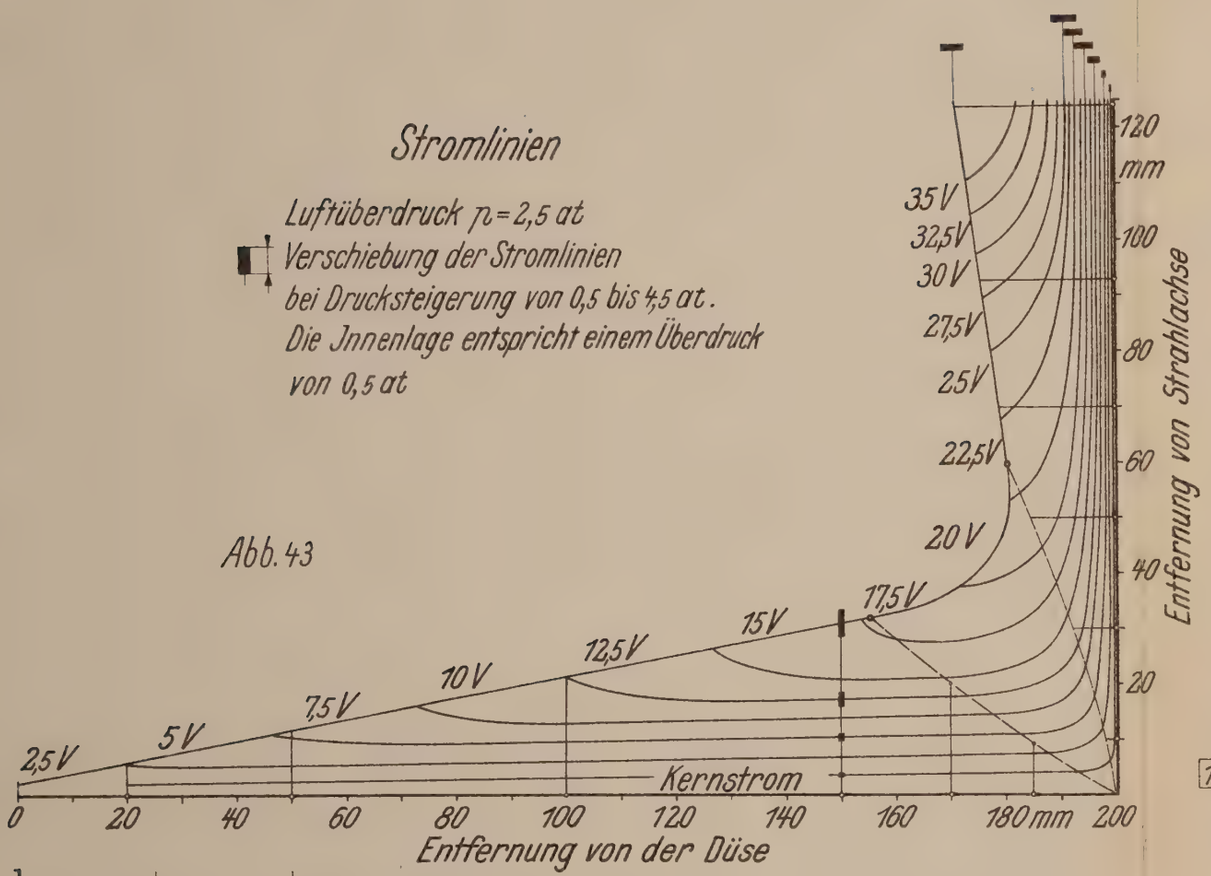


Abb. 43

Abb. 47

Geschwindigkeits-und Mengenverteilung im abfließenden Strahl Luftüberdruck p

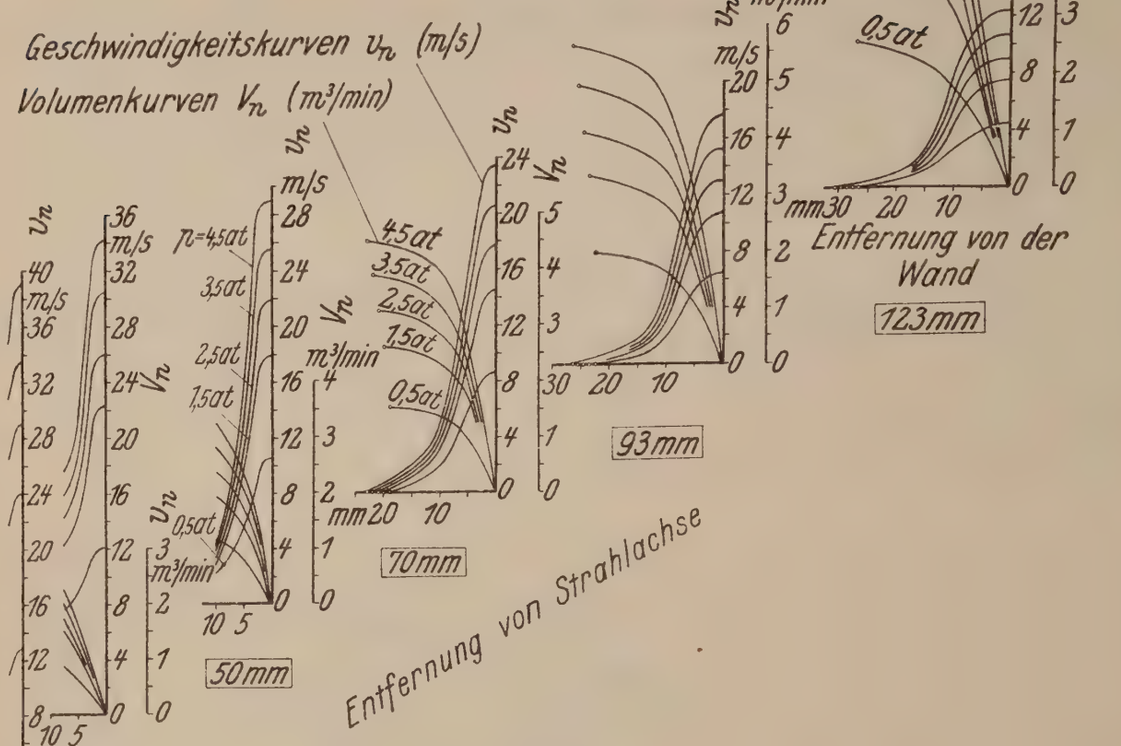


Abb. 44

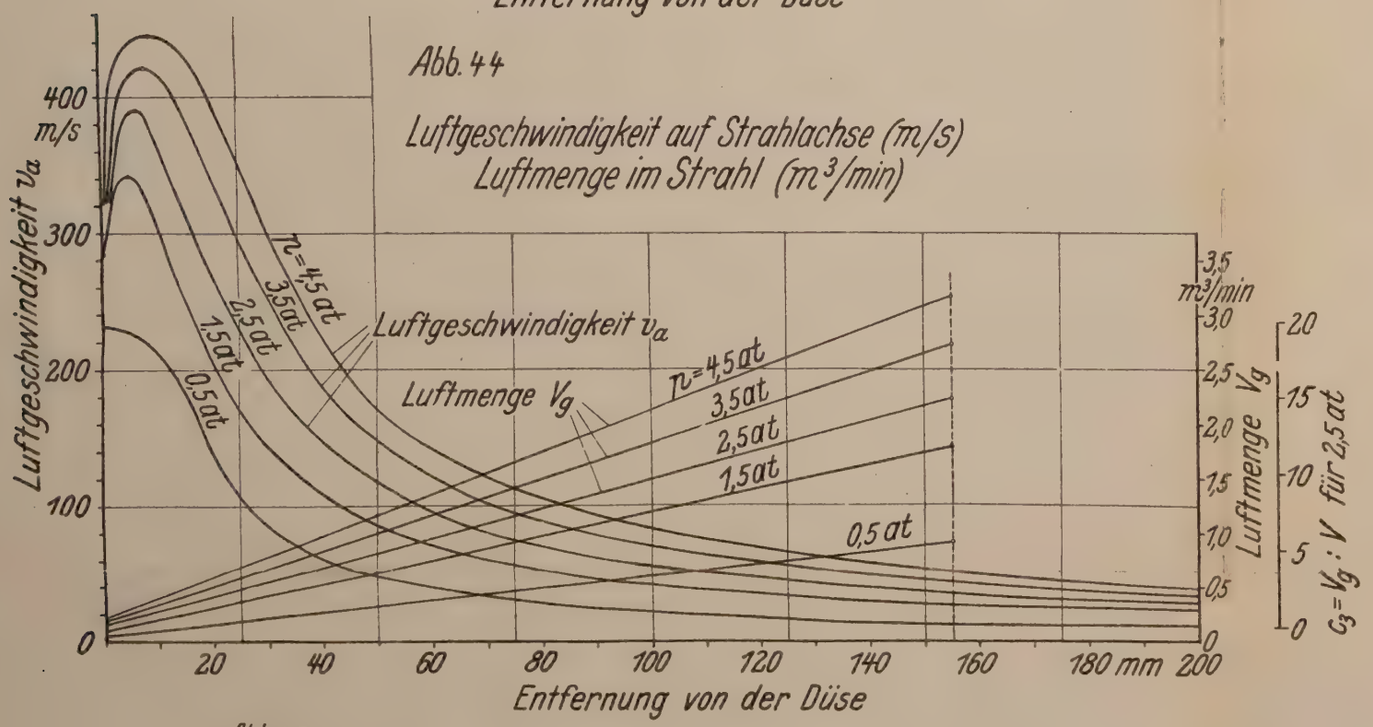


Abb. 48

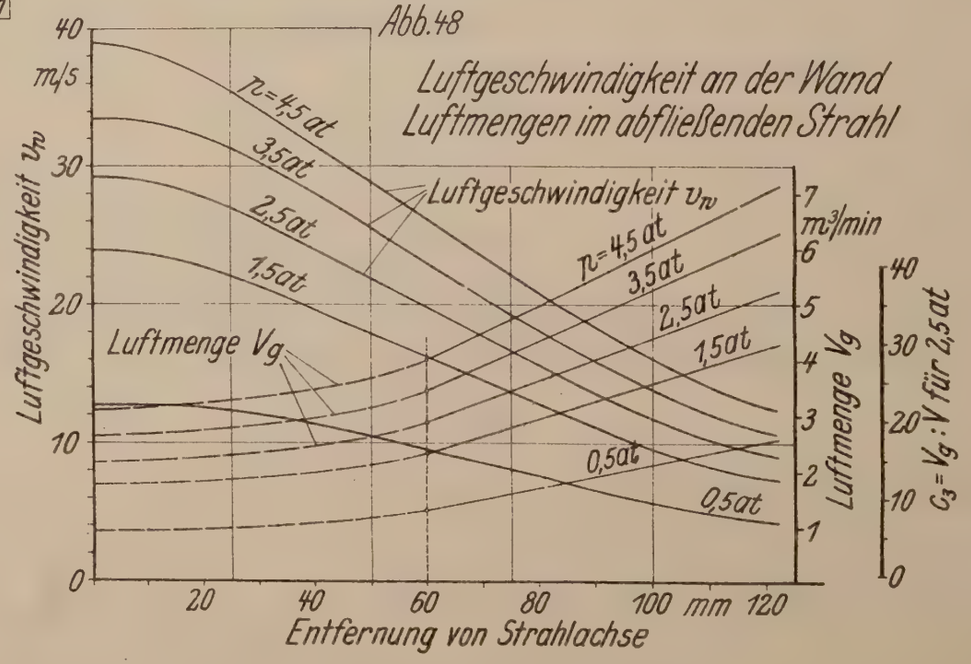


Abb. 45

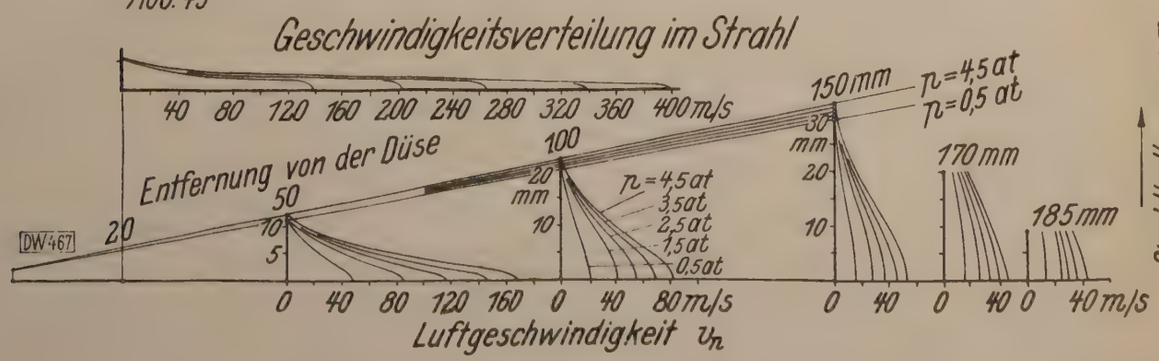
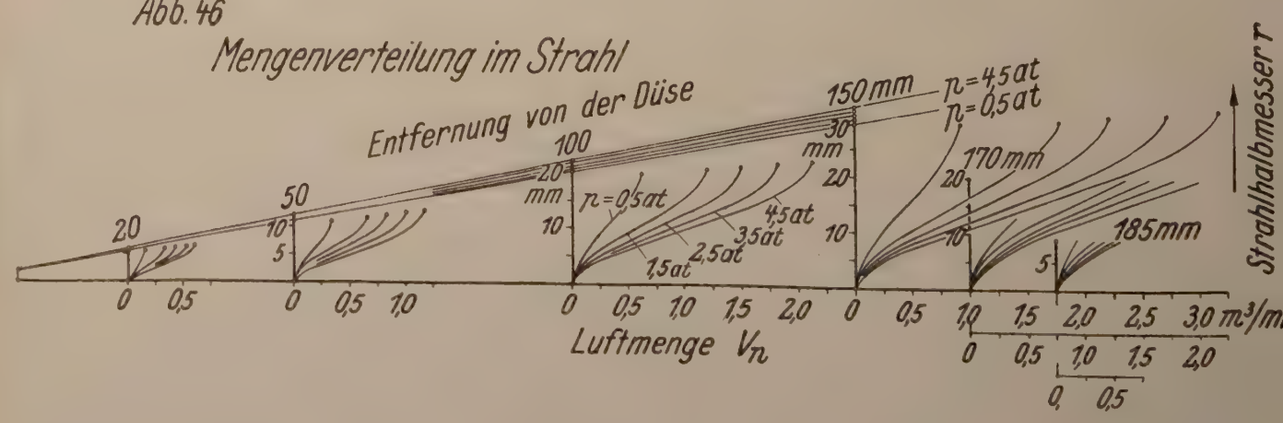


Abb. 46



Längenmaßstab 1:2,5

Linien gleicher Geschwindigkeit

$v_n = C_1 \, v_{max}$

v_n örtliche Momentangeschwindigkeit

v_{max} Höchstgeschwindigkeit

C_1 Umrechnungsfaktor (in den Linien gleicher Geschwindigkeit des Diagramms eingetragen)

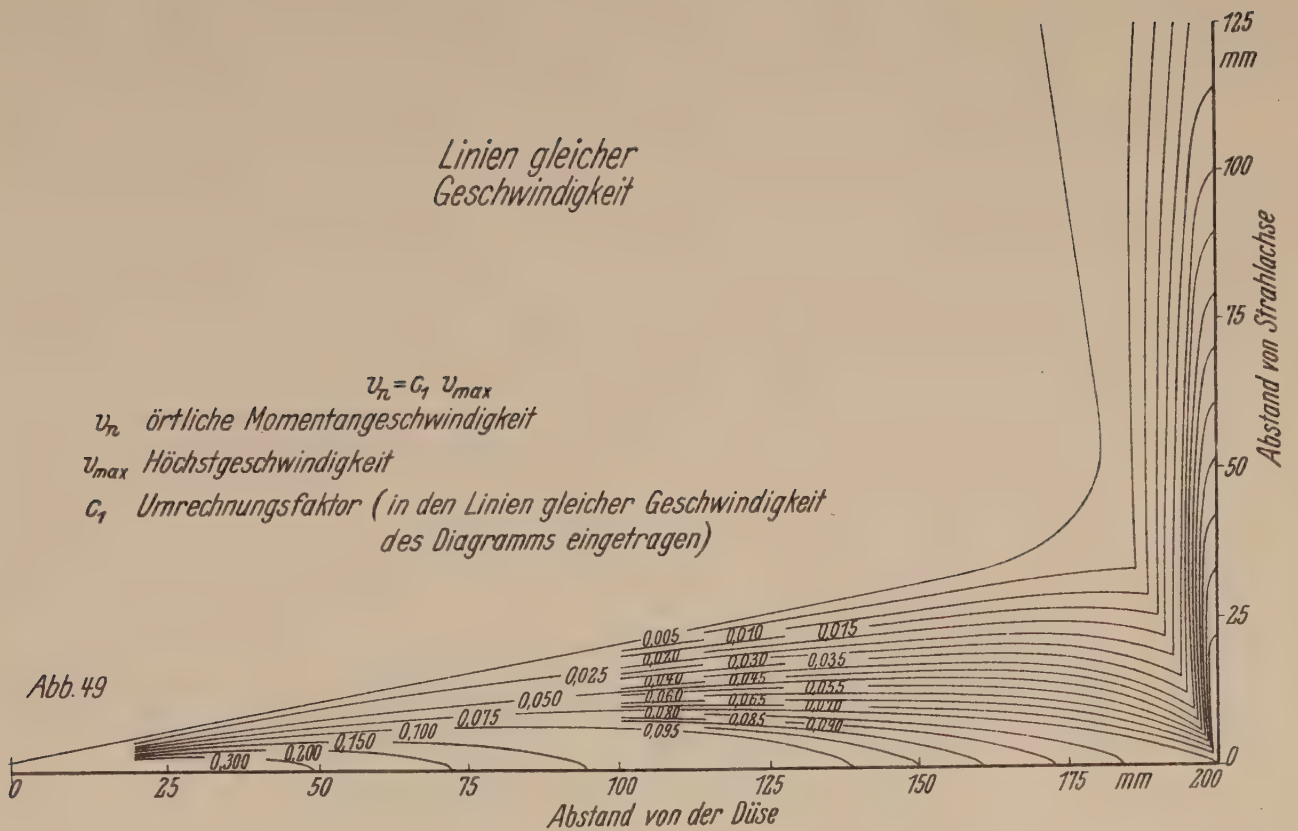


Abb. 49

Linien gleicher Neigung (gegen die Wand)

die Isotachen, Isoklinen sowie die Stromlinien entsprechen einem mittleren Luftüberdruck von 2,5 at

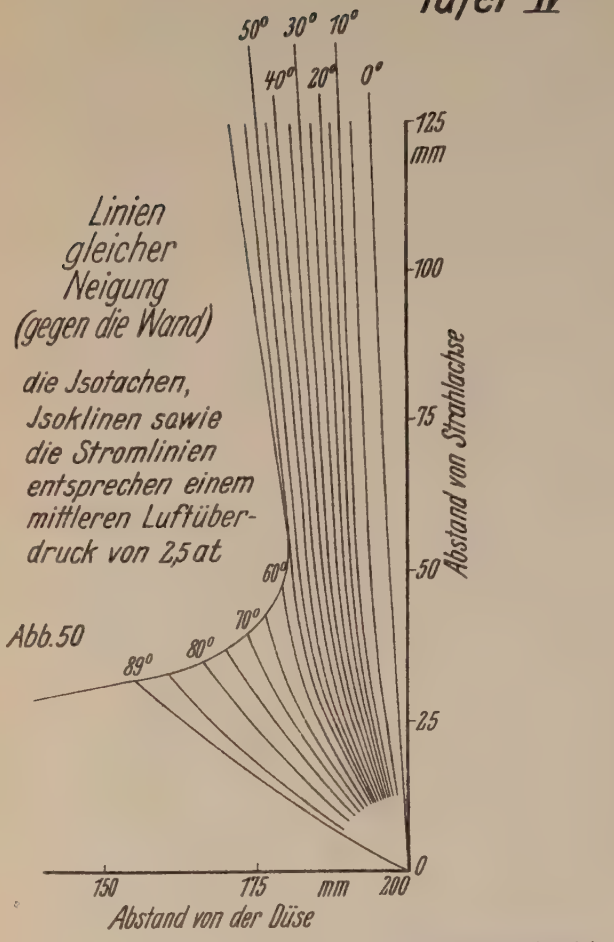


Abb. 50

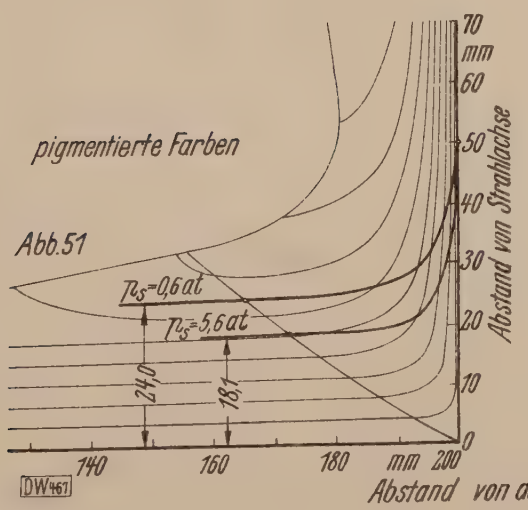


Abb. 51

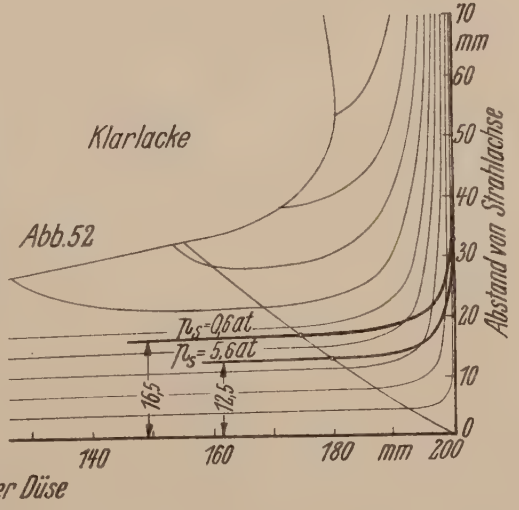


Abb. 52

DW 467

Abstand von der Düse

Grenzbahnen

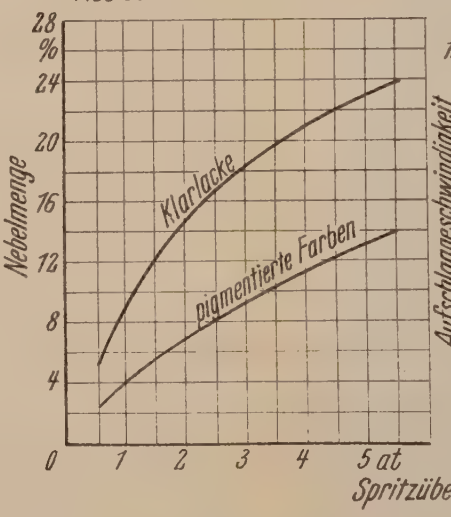


Abb. 53

Nebelmenge

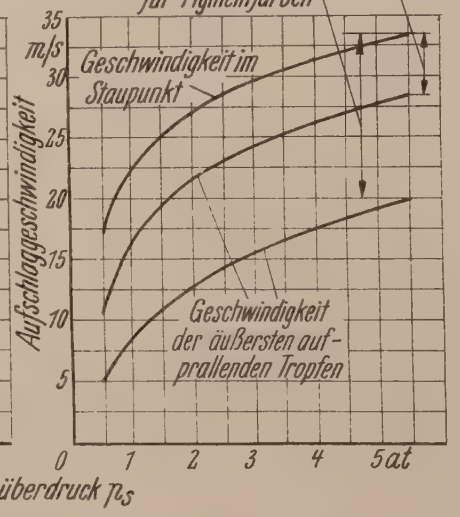


Abb. 54

Aufschlaggeschwindigkeit der Farbtropfen

Lebenslauf

Als Sohn des Prokuristen *Hermann Grosse* wurde ich am 2. März 1901 zu Berlin geboren und bestand nach regelmäßigem Schulbesuch im Juni 1918 die Reifeprüfung am Askanischen Gymnasium zu Berlin.

Nach Absolvierung der Praktikantenzeit in mehreren Großbetrieben bezog ich die Technische Hochschule Berlin und legte an dieser im April 1927 die Diplom-Hauptprüfung ab.

Vom Mai 1927 bis September 1930 war ich im Junkers-Konzern, Dessau, zunächst als Konstruktions- und Versuchsingenieur, später als Leiter einer Sonderwerkstatt tätig.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit bei der Knorr-Bremse A.-G., Berlin O 112, in enger Zusammenarbeit mit dem Fachausschuß für Anstrichtechnik beim Verein deutscher Ingenieure und Verein deutscher Chemiker.

Für Ermöglichung der Versuche bin ich Herrn Generaldirektor Dr. *Vielmetter,* für weitgehende Beratung den Herren Professor *Krauß* und Professor *Gottwein* zu Dank verpflichtet.

H. Grosse